

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

E.A.P. DE FÍSICA

**Detección de la Salinidad en los Suelos de Cultivos de
Algodón usando Imágenes de Satélite en la Costa Norte
del Perú**

TESIS

para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR:

Rolando Renee Badaracco Meza

Lima – Perú

2012

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar en las siguientes líneas mi agradecimiento a las personas que han contribuido a la realización del presente trabajo:

A mi tutor y director del Laboratorio de Teledetección, Dr. Joel Rojas Acuña, por su asesoramiento en este trabajo de tesis y por todo su apoyo y comprensión a lo largo de todo este tiempo. También al Ing. Eleazar Manuel Rufasto Campos director del Laboratorio de Suelos por su apoyo en los trabajos de campo realizados y los datos adquiridos por él en la UNPRG.

A mi colega de LABTEL y de la maestría en Física Edward Steve Alburquerque Salazar por su apoyo y comprensión a lo largo de todo este tiempo. En general, quisiera mostrar mi gratitud a todas aquellas personas que me han apoyado a lo largo de todo este tiempo

Agradezco al proyecto conjunto UNPRG-UNMSM titulado “Sistema de detección temprana de la sequía en la costa norte de Perú, usando la temperatura y salinidad del suelo y el índice de vegetación procedentes de las imágenes de satélite y su relación con los índices de la Oscilación Sureña El Niño” financiado por el Fondo de Desarrollo de Servicios Estratégicos (FDSE) con Código: 06-1773 del Ministerio de Agricultura. A través de este proyecto he sido beneficiado con una beca para realizar el presente trabajo de tesis ejecutado en el periodo 2008-2010.

Agradezco al CSI y al FCF por la subvención de una beca de Tesis de de Pregrado, resolución rectoral N° 04629-09, Octubre del 2009.

RESUMEN

En el presente trabajo, utilizamos la ciencia de la teledetección por ser una herramienta particularmente valiosa para obtener datos relevantes sobre el Suelo. El objetivo de este trabajo es estimar la salinidad del suelo con el uso de imágenes de satélite y su validación con los datos in-situ de conductividad eléctrica (CE) del suelo. Las áreas de estudio en este trabajo fueron cuatro: San Antero, La Viña, Saltur y Ucupe ubicadas en el distrito de Cayalti, Nueva Arica y Zaña, respectivamente. Estas áreas de estudio se encuentran en la cuenca de Zaña de la provincia de Chiclayo en la región de Lambayeque. En este trabajo se usaron imágenes de satélite procedente de los sensores ASTER, TM y ETM+ que fueron procesados y analizados usando el software de procesamiento de imágenes ENVI 4.5 y el lenguaje de programación IDL 7.0. Se determinó los componentes principales, el índice de sal (IndSal), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y las reflectancias espectrales de las bandas imágenes para correlacionarlos con los datos in-situ de la CE del suelo mediante el análisis de regresión lineal simple y múltiple y obtener modelos de la CE del suelo estimada. El análisis de regresión lineal múltiple presento mejores resultados que el análisis de regresión lineal simple. Para el área de La Viña se obtuvieron tres modelos de regresión lineal múltiple, el primer modelo se obtuvo al correlacionar los valores de la CE del suelo, el NDVI, el IndSal y el segundo componente principal (PC2) de la imagen ASTER obteniéndose un coeficiente de correlación negativa de - 0.87. El segundo modelo se obtuvo al correlacionar los valores de la CE del suelo, el NDVI y las reflectancias espectrales de las bandas 5 y 7 de la imagen ETM+ obteniéndose una correlación negativa de - 0.89. El tercer modelo se obtuvo al correlacionar los valores de la CE del suelo, el NDVI y las reflectancias espectrales de las bandas 5 y 7 de la imagen TM obteniéndose una correlación negativa de - 0.80. Para el área de San Antero se obtuvo un modelo de regresión lineal múltiple que se obtuvo al correlacionar los valores de la CE del suelo, el NDVI y las reflectancias espectrales de las bandas 3 y 7 de la imagen TM obteniéndose una correlación negativa de - 0,92. Para el área de Saltur se obtuvo un modelo de regresión lineal múltiple que se obtuvo al correlacionar los valores de la CE del suelo y las reflectancias espectrales de las bandas 5 y 7 de la imagen TM obteniéndose un coeficiente de correlación de 0,75. Para el área del Ucupe se obtuvo un modelo de regresión lineal múltiple que se obtuvo al correlacionar los valores de la CE

del suelo, las reflectancia espectrales de las bandas 5 y 7 de la imagen TM obteniéndose un coeficiente de correlación de 0,82. A partir de los modelos obtenidos de la estimación de la CE del suelo se generaron mapas temáticos de la distribución espacial de la CE del suelo estimada para cada área de estudio.

Palabras claves: Imágenes satelitales, NDVI, IndSal, CE, ASTER, TM y ETM.

ACRÓNIMOS

ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ATRIM	Atmosphere Removal Program
ATCOR	Atmospheric Correction Now
AVIRIS	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer
CE	Conductividad eléctrica
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System
EEM	Espectro electromagnético
ENVI	Environment for Visualizing Images
EOS	Earth Observing System
EOSAT	Earth Observation Satellite Company
ERSDAC	Earth Remote Sensing Data Analysis Center
ERTS	Earth Resource Technology Satellite
ETM+	Enhanced Thematic Mapper
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
HATCH	High Accuracy Atmospheric Correction for Hyper spectral data
HDF	High Density Files
HIS	Hyperspectral Imagery
HRV	High Resolution Video
IDL	Interactive Data Language
IFOV	Instantaneous field of view
INDSAL	Índice de salinidad
LDO	Longitud de onda central
MISR	Multiangle Imaging Spectroradiometer
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MODTRAN	Moderate Resolution Atmospheric Transmission
MOPIT	Measurements of Pollution in the Troposphere
MSS	Multispectral Scanner
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada
NIR	Infrarrojo muy cercano
NLAPS	National Landsat Archive Processing System

NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PCA	Análisis de componentes principales
RBV	Return Beam Vidicon
RCC	Radiometric Conversion Coefficients
REM	Radiación electromagnetic
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SPOT	Système Pour l'Observation de la Terre
SSI	Spectral Sciences Inc
SWIR	Short Wavelength Infrared
TIR	Thermal Infrared
TM	Thematic Mapper
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
VIS	Visible
VNIR	Visible and Near Infra-Red
WGS84	World Geodetic System 84

ÍNDICE

RESUMEN	ii
ACRONIMOS	iv
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedes	1
1.2. Salinidad del suelo	2
1.3. Medida de la conductividad eléctrica del suelo	3
1.4. Objetivos	5
1.5. Hipótesis	6
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE TELEDETECCIÓN	7
2.1. Radiación electromagnética (REM)	9
2.2. Espectro electromagnético (EEM)	10
2.3. Absorción espectral	12
2.4. Teoría de scattering en la atmosférica	13
2.4.1. Scattering de Rayleigh	14
2.4.2. Scattering de Mie	14
2.4.3. Dispersión no-selectiva	14
2.5. Influencia de la atmósfera en la teledetección	15
2.6. Principales componentes de la REM con influencia de la atmosfera.	16
2.6.1. Irradiancia	17
2.6.1.1. Irradiancia directa	17
2.6.1.2. Irradiancia difusa	18
2.6.1.3. Irradiancia del entorno	18
2.6.2. Radiancia	19
2.6.2.1. Radiancia directa (L_{pix})	19
2.6.2.2. Radiancia directa proveniente de la atmosfera (L_{atm})	19
2.6.2.3. Radiancia proveniente del entorno (L_{env})	19
2.6.3. Reflectancia	20

CAPÍTULO 3. PLATAFORMAS SATELITALES Y SENSORES	24
3.1. Características generales del satélite TERRA	24
3.1.1. Sensores a bordo del satélite TERRA	25
3.1.2. Características del sensor ASTER	26
3.2. Características generales de los satélites LANDSAT	28
3.2.1. Características orbitales de la serie de satélites LANDSAT	29
3.2.2. Sensores a bordo de la serie de satélites LANDSAT	29
3.2.3. Características de los sensores TM y ETM+	31
 CAPÍTULO 4. DATOS	 32
4.1. Ubicación del área de estudio	32
4.2. Adquisición de los datos de conductividad eléctrica del suelo	32
4.3. Adquisición de las imágenes de satélite	33
 CAPÍTULO 5. ANALISIS Y PRE-PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES	 36
5.1 Calibración radiométrica de la imagen ASTER level-1A	36
5.2 Calibración radiométrica de las imágenes TM y ETM+	36
5.3 Corrección geométrica de las imágenes de satélite	38
5.3.1 Corrección geométrica por puntos de control	39
5.4 Polinomios y puntos de control	40
5.5 Remuestreo	40
5.6 Interpolación	41
5.7 Conversión de la radiancia a reflectancia planetaria de las imágenes de satélite	42
5.8 Corrección atmosférica usando el módulo FLAASH	43
5.9 Paquete software de corrección atmosférica FLAASH	45
5.10 Módulo FLAASH	46
5.11 Extracción de los valores de reflectancia espectral del suelo	48
5.12 Estimación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	49
5.13 Rango de valores del NDVI	50
5.14 Estimación del Índice de salinidad	51
5.15 Análisis de componentes principales de las imágenes	51

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES	53
6.1 Comportamiento espectral de la superficie del suelo, agua, vegetación y suelo afectado por la salinidad	53
6.2 Distribución espacial del Índice de Salinidad en La Viña	55
6.3 Distribución espacial y temporal del NDVI en La Viña	57
6.4 Distribución espacial del NDVI en San Antero, Saltur y Ucupe	63
6.5 Modelos de regresión lineal simple	68
6.6 Modelos de regresión lineal múltiple	69
6.7 Distribución espacial de la conductividad eléctrica del suelo estimada	72
6.8 Gráficos de dispersión de la CE estimada y los valores de la CE in situ	77
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
7.1. Conclusiones	81
7.2. Recomendaciones	81
Referencias Bibliográficas	83
ANEXO 1. Definiciones y Magnitudes Radiométricas Básicas	88
ANEXO 2. Ubicación de los Puntos de Muestreo	95
ANEXO 3. Pre-Procesamiento de las Imágenes Usando IDL	99
ANEXO 4. Tabla de los Datos de la CE del Suelo In-Situ y la CE del Suelo Estimada	107

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Rangos generales de las plantas tolerantes a la salinidad	4
Tabla 2.	Tolerancia de la salinidad en algunos cultivos	4
Tabla 3.	Alcance de los suelos afectados por la sal	5
Tabla 4.	Principales procesos de scattering de la radiación electromagnética por la atmósfera	12
Tabla 5.	Características del Satélite TERRA	25
Tabla 6.	Características Generales del sensor ASTER	27
Tabla 7.	Características Generales de la serie LANDSAT	30
Tabla 8.	Descripción de los datos imágenes utilizados	35
Tabla 9.	Los valores máximos y mínimos de radiancia del sensor TM	38
Tabla 10.	Los valores máximos y mínimos de radiancia del sensor ETM+	38
Tabla 11.	Valores del NDVI para 4 fechas.	62
Tabla 12.	Modelos de regresión lineal simple.	68
Tabla 13.	Modelos de regresión lineal múltiple.	72
Tabla 14.	Tabla de los datos de CE de suelo in-situ de fecha 14 de diciembre del 2007 y los datos de CE del suelo estimada del área La Viña.	107
Tabla 15.	Tabla de los datos de CE del suelo in-situ de fecha 14 de diciembre del 2007 y los datos de CE del suelo estimada del área La Viña.	108
Tabla 16.	Tabla de los datos de CE del suelo in-situ de fecha 26 de enero del 2008 y los datos de CE del suelo estimada del área La Viña.	109
Tabla 17.	Tabla de los datos de CE del suelo in-situ de fecha 23 de agosto del 2008 y los datos de CE del suelo estimada del área Saltur.	110
Tabla 18.	Tabla de los datos de CE del suelo in-situ de fecha 23 de agosto del 2008 y los datos de CE del suelo estimada del área San Antero.	111
Tabla 19.	Tabla de los datos de CE del suelo in-situ de fecha 23 de agosto del 2008 y los datos de CE del suelo estimada del área Ucupe.	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Onda electromagnética propagándose en la dirección del eje +Y	9
Figura 2.	Espectro Electromagnético	10
Figura 3.	Espectro de susceptibilidad atmosférica	11
Figura 4.	Transmitancia Atmosférica en el Espectro del Sensor TM	11
Figura 5.	Efecto de la dispersión y absorción atmosférica	15
Figura 6.	Papel de la atmósfera en teledetección	16
Figura 7.	Componentes de la radiación	17
Figura 8.	Componentes de la Irradiancia	18
Figura 9.	Componente de la radiancia	20
Figura 10.	Reflexión difusa de una superficie lambertiana sobre un hemisferio	21
Figura 11.	Sensor Pasivo y Sensor Activo	24
Figura 12.	Satélite TERRA y sus 5 sensores de monitoreo de la Tierra	26
Figura 13.	Bandas espectrales del sensor ASTER	28
Figura 14.	Ubicación de las áreas de estudio	32
Figura 15.	Sistemas de coordenadas definidos para la imagen y el mapa	39
Figura 16.	Uso de los polinomios para localizar puntos en la imagen correspondiente a las posiciones de la cuadrícula de visualización	41
Figura 17.	Técnicas de Corrección Atmosféricas Disponibles	45
Figura 18.	Proceso esquemático del modelo FLAASH que muestra los pasos que intervienen en la conversión de radiancia a reflectancia	48
Figura 19.	Valores del NDVI para diferentes periodos	50
Figura 20.	Reflectancia de la superficie en función de la LDO. Las superficies usadas son el suelo, suelo afectado por la salinidad, agua y vegetación. Las LDO central de las 9 bandas VNIR y SWIR de las imágenes ASTER (20-11-07) han sido usadas.	53
Figura 21.	Reflectancia de la superficie en función de la LDO. Se ha usado las superficies del suelo, suelo afectado por la salinidad, agua y vegetación de la imagen TM (06-05-08) en las diferentes LDO central de las 6 bandas (1, 2, 3, 4, 5 y 7).	54
Figura 22.	Distribución Espacial del Índice de Salinidad en La Viña usando la reflectancia de la superficie espectral de las bandas 4 y 5 de la imagen ASTER (20-11-07).	55

Figura 23.	Gráfico de dispersión del índice de salinidad obtenidos del sensor ASTER y los datos in situ de conductividad eléctrica de La Viña. Esto presenta una correlación de 0.71.	56
Figura 24.	Gráfico de dispersión de la reflectancia de la superficie de la banda 4 del sensor ASTER y la conductividad eléctrica en La Viña.	56
Figura 25.	Gráfico de dispersión de la reflectancia de la superficie de la banda 5 del sensor ASTER y la conductividad eléctrica en La Viña.	57
Figura 26.	Distribución espacial del NDVI del área de estudio La Viña del sensor ASTER (20-11-07).	58
Figura 27.	Gráfico de dispersión del NDVI del sensor ASTER (20-11-07) y la conductividad eléctrica en La Viña (14-12-07).	58
Figura 28.	Distribución espacial del NDVI del área de estudio La Viña del sensor ETM+ (22-12-07).	59
Figura 29.	Gráfico de dispersión del NDVI de las bandas 3 y 4 del sensor ETM+ y la conductividad eléctrica del suelo en La Viña.	59
Figura 30.	Distribución espacial del NDVI del área de La Viña usando las bandas 3 y 4 del sensor ETM+ (08-02-08).	60
Figura 31.	Gráfico de dispersión del NDVI de las bandas 3 y 4 del sensor ETM+ y la conductividad eléctrica del suelo en La Viña.	60
Figura 32.	Distribución espacial del NDVI usando las bandas 3 y 4 del sensor TM de (06-05-08) en la Viña.	61
Figura 33.	Distribución espacial del NDVI del área de San Antero usando las bandas 3 y 4 del sensor TM de la fecha del 6 de mayo del 2008.	64
Figura 34.	Gráfico de dispersión del NDVI usando las bandas 3 y 4 del sensor TM y la conductividad eléctrica del suelo en San Antero.	65
Figura 35.	Distribución espacial del NDVI usando las bandas 3 y 4 del sensor TM (06-05-08) en Saltur.	66
Figura 36.	Gráfico de dispersión del NDVI usando las bandas 3 y 4 del sensor TM y la conductividad eléctrica en Saltur.	66
Figura 37.	Distribución espacial del NDVI usando las bandas 3 y 4 del sensor TM (06-05-08) en Ucupe.	67
Figura 38.	Gráfico de dispersión NDVI usando las bandas 3 y 4 del sensor TM y la conductividad eléctrica del suelo en Ucupe.	68

Figura 39.	Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo del área de La Viña usando la imagen ASTER de la fecha 20 de noviembre del 2007.	72
Figura 40.	Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo del área de La Viña usando la imagen ETM+ de la fecha 22 de diciembre del 2007.	73
Figura 41.	Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo del área de La Viña usando la imagen ETM+ de la fecha 8 de febrero del 2008.	74
Figura 42.	Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo del área de Saltur usando la imagen TM de la fecha 6 de mayo del 2008.	74
Figura 43.	Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo del área de San Antero usando la imagen TM de la fecha 6 de mayo del 2008.	75
Figura 44.	Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo del área de Ucupe usando la imagen TM de la fecha 6 de mayo del 2008.	76
Figura 45.	Gráfico de dispersión de la CE estimada (usando la primera ecuación de la tabla 12) y la CE in situ para el área La Viña	77
Figura 46.	Gráfico de dispersión de la CE estimada (usando la segunda ecuación de la tabla 12) y la CE in situ para el área La Viña	78
Figura 47.	Gráfico de dispersión de la CE estimada (usando la tercera ecuación de la tabla 12) y la CE in situ para el área La Viña	78
Figura 48.	Gráfico de dispersión de la CE estimada (usando la cuarta ecuación de la tabla 12) y la CE in situ para el área Saltur.	79
Figura 49.	Gráfico de dispersión de la CE estimada (usando la quinta ecuación de la tabla 12) y la CE in situ para el área San Antero.	79
Figura 50.	Gráfico de dispersión de la CE estimada (usando la sexta ecuación de la tabla 12) y la CE in situ para el área Ucupe.	80
Figura 51.	Radiancia	90
Figura 52.	Geometría de un Emisor Lambertiano	91
Figura 53.	Exitancia radiante computada	92
Figura 54.	Ángulo cenital solar	92
Figura 55.	Iluminancia atmosférica y el ángulo de elevación solar	93
Figura 56.	Posición de la Tierra con respecto al Sol	94

Figura 57.	Muestra los puntos de los datos in situ de La Viña	95
Figura 58.	Muestra los puntos de los datos in situ de San Antero	96
Figura 59.	Muestra los puntos de los datos in situ de Ucupe	97
Figura 60.	Muestra los puntos de los datos in situ de Saltur	98

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En el Perú, las áreas de producción agrícola que presentan mayores problemas de salinidad se localizan principalmente en la Región de Lambayeque ubicada en la costa norte del Perú. La salinidad en esta región se considera un problema serio debido a que aproximadamente el 50% del área total cultivada se encuentra afectada por sales en diferente grado (Ministerio de Agricultura, 2008). Tradicionalmente, los estudios de la salinidad se obtienen tomando muestras de suelo en puntos ubicados en una cuadrícula de uno o dos kilómetros. Debido a la dinámica del proceso de salinización en los suelos, se requieren métodos que proporcionen resultados a corto plazo sobre la ubicación de las áreas afectadas y que ayuden a dar seguimiento a las medidas aplicadas para su rehabilitación.

1.1. Antecedentes

En el año 1992, Joshi y Sahai prepararon mapas de áreas costeras del estado de Gujartat en la India, que proveen información sobre la extensión e intensidad de las tierras afectadas por la salinidad. Para estos mapas se usaron imágenes Landsat 2 de 80 m de resolución espacial e imágenes Landsat 5 TM. La salinidad detectada varió entre 0,24 y 12,18 mmhos/cm (Joshy y Sahai, 1992). En este mismo año, Dwivedi y Rao identificaron que la mejor combinación de las imágenes TM del satélite LANDSAT 5 para delimitar los suelos afectados por la salinidad en la planicie aluvial Indo-Gangetic fueron las bandas 1, 3 y 5 (Dwivedi y Rao, 1992).

Estudios realizados en el año 1992 por Wiegand y otros, en California y Texas, usando parcelas de observación de 36 ha y 59 ha cultivadas con algodón y caña de azúcar, consiguieron obtener datos de salinidad y parámetros fisiológicos en sitios de muestreo para calibrar imágenes del satélite Spot-1 HRV (High Resolution Video), imágenes video gráficas y fotografía aérea infrarroja. Estas parcelas se clasificaron espectralmente y se desarrollaron modelos estadísticos a partir de los datos de campo de conductividad

eléctrica, conduciendo a la estimación de la salinidad de todos los píxeles de las parcelas estudiadas y a la obtención de mapas de clasificación por salinidad (Wiegand et al., 1992).

En 1994, Singh monitoreo los cambios en la recuperación y la extensión de los suelos afectados por la salinidad en el norte de la India. Se usaron mapas preparados por el método de campo de 1956, los cuales mostraban grandes bloques de suelos de más de 80 ha afectadas por la salinidad. Estos se compararon con mapas elaborados a partir de fotografías aéreas a escala 1: 40000 de 1972 e imágenes LANDSAT a escala 1: 50000 de 1986 que en conjunto permitían una precisión de un tamaño de 2 ha. Se constató, que la recuperación de suelos salinizados en el periodo 1956 – 1986 fue de un 22% mientras que la extensión de la salinidad en la periferia de los bloques fue de 3% (Singh, 1994).

En 1997, en un estudio de estimación de la salinidad y pérdidas de rendimiento de cosechas en el Valle el Carrizo y Rio Yaqui, se usaron imágenes LANDSAT y el sensor EM-38, obteniéndose los resultados siguientes: la correlación entre el NDVI y la CE fue $r = 0.72$, 0.83 para el trigo; $r = 0.64$; para el algodón, y $r = 0.66$ para la soya (Pulido, 1997).

En el año 2003, se exploró la capacidad de las bandas de las imágenes ASTER para el mapeo de la salinidad de acuerdo con la relación temporal entre la sal del suelo antes de la siembra y durante el crecimiento del cultivo. También se estimó la salinidad a través de la evapotranspiración, usando el algoritmo SEBAL para el balance de la energía superficial de las tierras (Al-Khaier, 2003).

1.2. Salinidad del Suelo

La salinidad es un ejemplo de degradación química del suelo que presenta cambios significativos en su comportamiento físico. La distribución de sales en el suelo es heterogénea porque éste es un sistema complejo y variable en el espacio y tiempo a diferentes escalas.

El patrón de la variabilidad del contenido de sales cambia en función de la estación del año, aumentando su concentración en la temporada de estiaje, lo cual afecta el estado físico de la

superficie del suelo disminuyendo drásticamente su no filtrabilidad (Sumner y Naidu, 1998). En estas circunstancias, resulta difícil monitorear la composición química del suelo con la precisión aceptable así como recopilar la información a diferentes escalas espaciales. Un estudio multitemporal de la salinidad requiere abordar un gran lapso de tiempo para ser representativo de las tendencias y magnitudes de los procesos de degradación, así como para definir los rasgos básicos de la dinámica, extensión y grado de salinización de los suelos (Schmid et al., 2005).

1.3. Medida de la conductividad eléctrica del suelo

La conductividad eléctrica (CE) del suelo, sirve para estimar la concentración total de sales en una solución, pero no indica qué sales están presentes. La conductividad eléctrica se expresa en dS/m (anteriormente denominada mmho/cm). Cuando se habla de conductividad eléctrica, debemos siempre especificar si es la conductividad eléctrica del agua de riego, la conductividad eléctrica del agua de drenaje o la conductividad eléctrica de la solución del suelo.

En el caso de la conductividad eléctrica de la solución del suelo, hay que especificar el estado de humedad del suelo. En laboratorios de suelo, se determina la conductividad eléctrica del extracto de suelo saturado o una relación determinada de suelo: agua. A medida que el suelo se seca, la conductividad eléctrica de la solución del suelo va en aumento. A una misma cantidad de sales aplicada al suelo, la concentración de las sales en la solución de suelo en capacidad de campo será menor en cuanto más agua sea capaz de retener el suelo.

Desde el punto de vista agrícola, los suelos salinos son los que contienen suficiente sales solubles en la zona de la raíz que afectan negativamente el crecimiento de la mayoría de los cultivos (Tabla 1). Para efectos de la definición, los suelos salinos tienen una conductividad eléctrica de los extractos de saturación más de 4 dS.m^{-1} a 25°C (Richards, 1954).

Tabla 1. Rangos generales de las plantas tolerantes a la salinidad (Richards, 1954)

CE (dS.m ⁻¹)	Clases de la salinidad	Efectos
0 – 2	No salino	Suelos normales
2 – 4	Ligeramente salino	Son afectados los rendimientos de los cultivos muy sensibles
4 – 8	Moderadamente salinos	Son afectados los rendimientos de la mayoría de los cultivos
8 – 16	Fuertemente salinos	Sólo se obtienen rendimientos aceptables en los cultivos tolerantes
> 16	Extremadamente salinos	Muy pocos cultivos dan rendimientos aceptables

Mientras los niveles de la salinidad aumentan, las plantas extraen el agua del suelo con dificultad, agravando las condiciones del estrés hídrico. La alta salinidad del suelo también puede causar desequilibrios de nutrientes que, a continuación dan lugar a la acumulación de elementos tóxicos para las plantas, y reducen la infiltración del agua si el nivel de la sal es alto. En muchas áreas, la salinidad del suelo es el factor que limita el crecimiento de las plantas. En la Tabla 2, muestra la tolerancia de la salinidad en algunos cultivos.

Tabla 2. Tolerancia de la salinidad en algunos cultivos (Doorenbos y Kassam, 1979)

Cultivo	Valor umbral	10% Perdida de rendimiento	25% Perdida de rendimiento	50% Perdida de rendimiento	100% Perdida de rendimiento
	CE(dS.m ⁻¹)	CE(dS.m ⁻¹)	CE(dS.m ⁻¹)	CE(dS.m ⁻¹)	CE(dS.m ⁻¹)
Frijoles	1.0	1.5	2.3	3.6	6.5
Algodón	7.7	9.6	13.0	17.0	27.0
Sorgo	1.7	2.5	3.8	5.9	10.0
Azúcar	4.0	5.1	7.2	11.0	18.0
trigo	6.0	7.4	9.5	13.0	20.0

Hay extensas áreas de suelos afectados por la sal en todos los continentes, pero su grado y distribución no se han estudiado detalladamente (FAO, 1988). A pesar de la disponibilidad de muchas fuentes de información, los datos exactos referentes a las tierras afectadas por la salinidad en el mundo están algo escaso (Gupta y Abrol, 1990).

Estadísticas relativas a la extensión de las zonas afectadas por la sal varían de acuerdo a los autores, pero las estimaciones son, en general, cerca de mil millones de hectáreas (Tabla 3), que representan alrededor del 7% de la medida continental de la Tierra. Además de estas zonas afectadas naturalmente por la sal, unos 77 millones de hectáreas han sido salinizados como consecuencia de las actividades humanas con el 58% de estos concentrados en áreas irrigadas. En promedio, las sales afectan al 20% de las tierras irrigadas en el mundo, pero esta cifra aumenta a más del 30% en países como Egipto, Irán y Argentina (Ghassemi et al., 1995).

Tabla 3. Alcance de los suelos afectados por la sal (Szabolcs, 1979)

Región	Millones de Hectáreas
México y Centro América	2.0
América del Norte	15.7
Sudeste de Asia	20.0
Europa	50.8
África	80.5
Sur de Asia	84.8
América del Sur	129.2
Norte y centro de Asia	211.7
Australia	357.3
Total	952.0

Cerca de 10 millones de hectáreas de tierras irrigadas se abandonan cada año debido a los efectos nocivos de la irrigación, principalmente de la salinización y de la alcalinización secundaria (Szabolcs, 1987). A pesar del conocimiento general de estos problemas y experiencias tristes del pasado, la salinización y la inundación de la tierra irrigada continúan aumentando. En algunos países, la salinización de la tierra puede incluso amenazar a la economía nacional, particularmente, lugares como Argentina, Egipto, la India, Iraq, Paquistán, Siria e Irán (Rhoades, 1990).

1.4. Objetivos

El objetivo de este trabajo es estimar la salinidad del suelo con el uso de imágenes de satélite y su validación con los datos in-situ de conductividad eléctrica del suelo. Generar modelos de regresión lineal simple y múltiple utilizando los valores de conductividad

eléctrica, reflectancia de las bandas, NDVI, IndSal y los componentes principales de las imágenes para, finalmente, diseñar imágenes de distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo de las áreas de estudio.

1.5. Hipótesis

Podemos relacionar los valores de la conductividad eléctrica del suelo, en los campos con cultivo y sin cultivo de algodón, y los valores de las reflectancias espectrales, obtenidos a través de las imágenes de satélite de los sensores ASTER, TM, ETM+ y desarrollar una metodología para estimar la salinidad del suelo.

El presente trabajo de tesis está estructurado en siete capítulos cuyos contenidos son los siguientes:

En el Capítulo 1 se presenta el origen y las causas de la salinidad del suelo, así como también el estudio de la conductividad eléctrica del suelo para determinar el grado de salinidad de los suelos. En el Capítulo 2 se presenta los principios físicos para entender la naturaleza de la teledetección y las normas que la rigen. En el Capítulo 3 fue necesario tratar adecuadamente el uso de los satélites, la naturaleza y funcionamiento de los sensores remotos para un mejor entendimiento del uso de la Teledetección. En el Capítulo 4 se presenta la ubicación de las áreas de estudio, los datos in-situ de conductividad eléctrica del suelo y los datos imágenes que se usaron en el presente trabajo de tesis. En el Capítulo 5 se describe el análisis y el pre-procesamiento de las imágenes de satélite. En el Capítulo 6 se presenta los resultados y las discusiones. En el Capítulo 7 se presentan las conclusiones y recomendaciones referentes a este trabajo de investigación.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS FÍSICOS DE TELEDETECCIÓN

Desde el punto de vista físico, la teledetección parte del principio de la existencia de una perturbación (la energía electromagnética) que el sistema observado produce en el medio. Esta energía se transmite al sistema receptor que capta una señal que será registrada, almacenada y posteriormente interpretada. Desde el punto de vista práctico, la teledetección tiene por objeto el reconocimiento de las características de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella tienen lugar a partir de los datos registrados por el sensor. El principal reto con que se enfrentan quienes trabajan en el campo de la teledetección consiste en la transformación de los datos registrados por el sensor en magnitudes físicas y, en consecuencia, en información útil al usuario.

2.1. Radiación electromagnética (REM)

Las ecuaciones de Maxwell relacionan los vectores campo eléctrico \vec{E} y magnético \vec{B} con sus fuentes, que son las cargas eléctricas, las corrientes y los campos variables. Las ecuaciones de Maxwell aplicadas al espacio libre, son (Tipler, 2000):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \text{div } \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \text{rot } \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \sigma \vec{E} \quad (2.4)$$

En dónde:

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$, es la permeabilidad del espacio libre.

\vec{E} = intensidad de campo eléctrico (N C^{-1}).

\vec{B} = inducción magnética (T).

ρ = densidad de carga eléctrica volumétrica (C m^{-3})

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}$, es la permisividad del espacio libre.

σ = conductividad eléctrica ($\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$).

t = tiempo (s).

Las ecuaciones de Maxwell predicen la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan a través del espacio a la velocidad de la luz. Para comprender más a fondo la predicción de las ondas electromagnéticas, consideraremos un campo eléctrico oscilante en la dirección del eje Z y un campo magnético en la dirección del eje X, como se muestra en la Figura 1, de tal modo que las ecuaciones (2.3) y (2.4) se pueden expresar (Tipler, 2000):

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.6)$$

Derivando nuevamente en la dirección del eje Y, las ecuaciones (2.5) y (2.6) y combinándolas entre sí, se obtiene la forma general de la ecuación de onda.

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial y^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

De donde se deduce que la rapidez de las ondas electromagnéticas está dada por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.9)$$

Si tomamos como valor a: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$ y $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$, se determina que $c = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, precisamente la misma que la rapidez de la luz en el vacío.

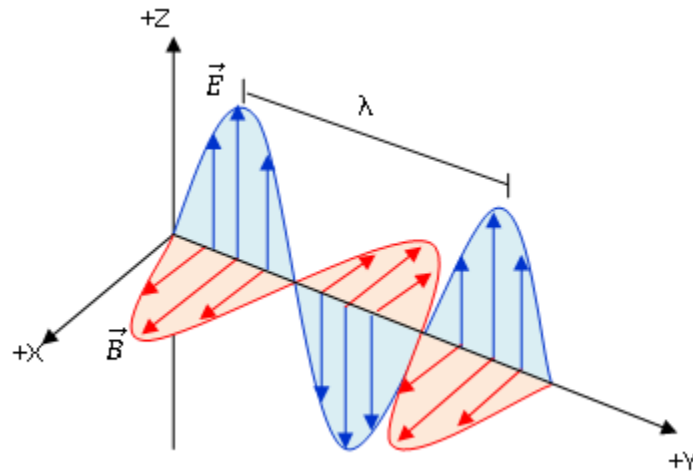


Figura 1. Onda electromagnética propagándose en la dirección del eje +Y (Tipler, 2000).

2.2. Espectro electromagnético (EEM)

El espectro electromagnético se extiende desde los rayos cósmicos con longitudes de onda hasta las radiofrecuencias bajas y longitudes de onda larga, aunque algunos sensores han realizado trabajos para longitudes de onda más cortas. Las longitudes de onda que generalmente son más usadas están alrededor de 300 y 400 nanómetros. La región más empleada es la región del visible e infrarrojo cercano entre 400 nm y 1 μm . Las regiones de transmisión atmosférica y/o regiones infrarrojas son usadas por sistemas radiométricos que trabajan desde 3 μm hasta 15 μm (infrarrojo termal). Las microondas y los sensores de radar operan en longitudes de onda de rango de 1mm a 1m. El espectro visible es aquel con el que estamos más familiarizados; puede ser observado cuando la luz blanca es dispersada por gotas de agua en un arco iris. Todos los tipos de cobertura terrestre (tipos de roca, cuerpos de agua, tipos de vegetación, cascos urbanos, etc.), absorben una parte de la radiación electromagnética, dándole una firma distinguible de otra a lo largo del espectro. Se puede analizar los datos de las imágenes provenientes de sensores remotos y crear hipótesis bastante precisas acerca de una cobertura gracias a su firma espectral (Slater, 1980).

La Figura 2 muestra las principales regiones del espectro electromagnético empleadas en teledetección. Las regiones correspondientes al infrarrojo cercano y medio son muchas veces referidas como la región del infrarrojo de onda corta (SWIR por sus siglas en inglés). Esta se distingue de la región termal o de la región del infrarrojo lejano, que también es conocida como la región del infrarrojo de onda larga (LWIR por sus siglas en inglés). Estas dos regiones se distinguen en que el SWIR se caracteriza por radiación reflejada mientras que el LWIR se caracteriza por emisión de radiación.

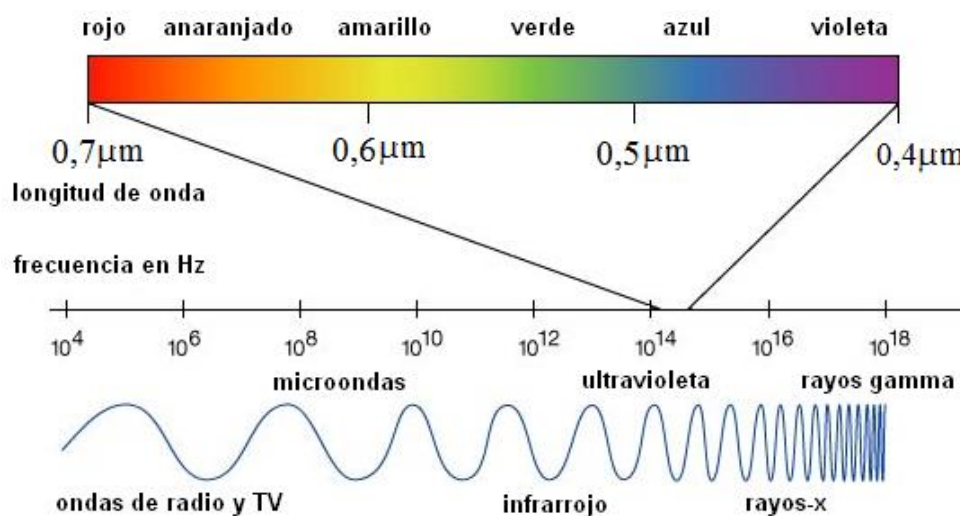


Figura 2. Espectro electromagnético (Slater, 1980)

2.3. Absorción espectral

La absorción se define como la transformación energética sufrida por la radiación cuando atraviesa un medio. Como resultado de la transformación energética hay una alteración neta de los niveles energéticos de las moléculas y partículas que componen el medio. La absorción espectral tiene una particular importancia en teledetección especialmente en lo relativo a sensores pasivos, que utilizan la radiación electromagnética proveniente del sol (Figura 3), ya que la atmósfera se comporta como un filtro selectivo de tal forma que algunas regiones del espectro eliminan cualquier posibilidad de observación remota (Sobrino, 2000).

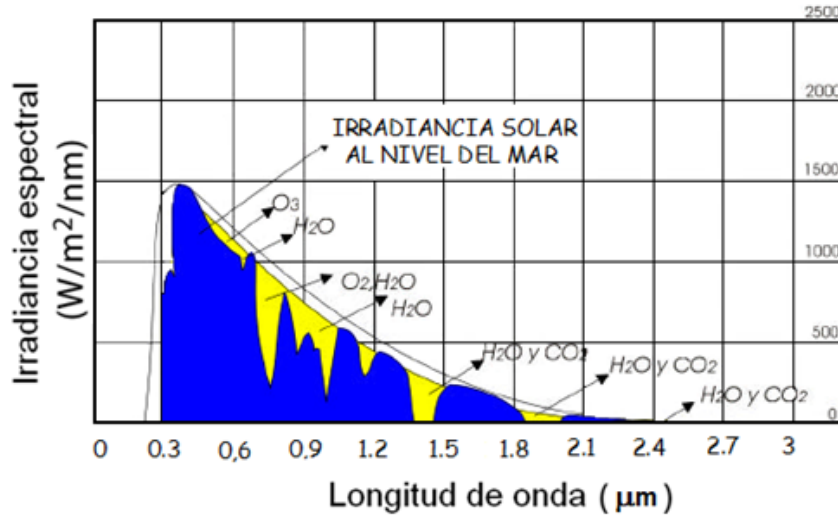


Figura 3. Espectro de susceptibilidad atmosférica (Erdas Inc, 1999)

Físicamente, la absorción espectral es definida como una transformación termodinámica irreversible de energía radiante en calor. En el espectro visible y más allá de 0.8 micrones la absorción en una atmósfera limpia es despreciable. Mientras que en una atmósfera polucionada o nubosa, debe tenerse en cuenta un cálculo de transferencia radiante. La Figura 4 muestra la transmitancia atmosférica en el espectro de los 0.4 μm a 2.5 μm, mostrando las regiones de baja y alta transmitancia. Los sensores como el Landsat TM colectan datos en regiones de alta transmitancia (TM1:0.45-0.52 μm TM2: 0.52 - 0.60 μm TM3: 0.63-0.69 μm TM4: 0.76-0.90 μm, TM5:1.5-1.75 μm, TM7: 2.08-2.35 μm), Figura 4.

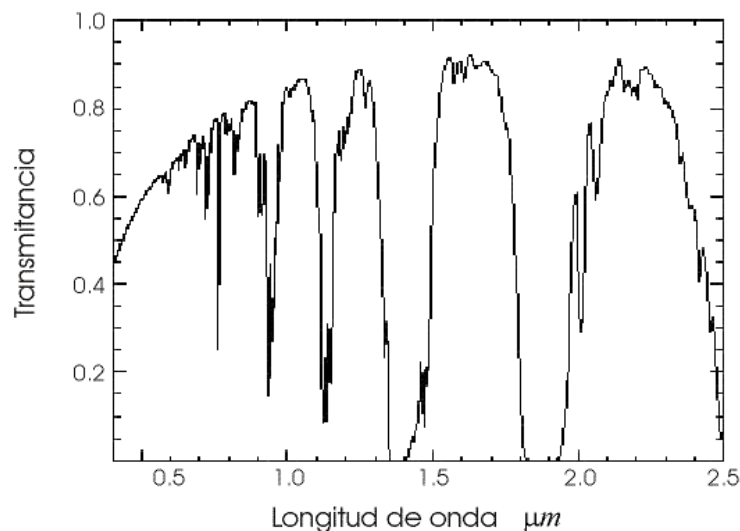


Figura 4. Transmitancia atmosférica en el espectro del sensor TM (Geosystems, 2000).

2.4. Teoría de scattering en la atmosférica

La radiación solar que llega a la superficie terrestre está atenuada en su intensidad por diversos procesos que se producen a lo largo de su recorrido a través de la atmósfera terrestre. Estos procesos son: Absorción selectiva por los gases y por el vapor de agua de la atmósfera. Scattering de Rayleigh, debida también a los gases y al vapor de agua. Difusión y absorción de aerosoles o turbidez (Scattering de Mie). El estudio de la dispersión de la luz por efectos atmosféricos se hizo en un principio para explicar el azul del cielo y fue Lord Rayleigh el que hizo una contribución más importante en este campo, quien sostuvo que las moléculas de aire dispersaban la luz. Los cálculos de Rayleigh están basados principalmente para partículas dispersoras pequeñas y homogéneas cuyas propiedades eléctricas son distintas a las del medio y se comportan prácticamente como dipolos (Lira et al., 1983). Datos experimentales muestran que el scattering de Rayleigh predomina en atmósferas limpias y secas, mientras que la presencia de partículas de polvo y gotas genera otro tipo de scattering, la cual fue estudiada por G. Mie (Lira et al., 1983). El proceso de scattering depende de la distribución del tamaño de elementos esparcidos, su composición, concentración, y la longitud de onda o distribución en longitudes de onda del flujo radiante sobre ellas (Slater, 1980). La Tabla 4 muestra algunos ejemplos de la dependencia de dichos procesos de dispersión.

Tabla 4. Principales procesos de scattering de la radiación electromagnética por la atmósfera (Lira et al., 1983).

Proceso de scattering	Dependencia con la longitud de onda	Diámetro (d) promedio de las partículas dispersoras (λ)	Tipo de partículas
Rayleigh	λ^{-4}	$\frac{d}{\lambda} \ll 1$	Moléculas de aire
Mie	$\lambda^0 - \lambda^{-4}$	$\frac{d}{\lambda} \ll 0.1 - 10$	Humo, neblina
No-Selectiva	λ^0	$\frac{d}{\lambda} \ll 10$	Polvo, nubes

A menudo, a la combinación de los procesos de absorción y scattering se le denomina atenuación. Por conveniencia y simplicidad cuando se están considerando procesos de dispersión, a menudo se toman las siguientes presunciones (Slater, 1980):

- La dispersión de los elementos está distribuida al azar alrededor de la dispersión media.
- Cuando se habla de dispersión cualquier elemento es independiente de sus vecinos.
- Los elementos no son metálicos ni absorbentes y
- La forma y anisotropía de los elementos es ignorada.

Como se mencionó anteriormente, en los procesos de dispersión atmosférica el diámetro de las partículas tiene una particular importancia ya que de él depende el modelo matemático a estudiar para una atmósfera en particular, lo que implica distintos tipos de absorción y scattering , como el scattering de Rayleigh, el scattering de Mie y la no-selectiva.

2.4.1. Scattering de Rayleigh

Afecta las longitudes de onda más cortas y es la de mayor influencia en teledetección, se habla de scattering de Rayleigh cuando las longitudes de onda son inferiores al diámetro de las partículas (Chuvieco, 1990). El scattering de Rayleigh es también denominada dispersión molecular y es causada por las moléculas de nitrógeno y oxígeno presentes en la atmósfera terrestre. La dispersión molecular es estudiada a través de los denominados coeficientes de dispersión, los cuales miden la atenuación de la intensidad de la radiación para un haz incidente y esta atenuación está dada por:

$$\frac{dI_{\lambda}}{dx} = -S_{\lambda}I_{\lambda} \quad (2.10)$$

Donde dx es la longitud del trayecto en el cual el haz se difunde, S_{λ} es el coeficiente de difusión e I_{λ} es la radiación para una longitud de onda. La atenuación para el aire puede ser descrita en términos de coeficientes de dispersión Rayleigh $\beta_{0\lambda}$ (Slater, 1980).

$$\beta_{0\lambda} = \frac{2\pi^2}{H\lambda^4} [n(\lambda) - 1]^2 (1 + \cos^2\theta_{id}) \quad (2.11)$$

Donde H es el número de moléculas por unidad de volumen en la atmósfera, $n(\lambda)$ es el índice refractivo espectral de las moléculas para la longitud de onda, θ_{id} es el ángulo entre el flujo incidente y el dispersado, y λ es la longitud de onda del flujo incidente. El flujo dispersado es distribuido simétricamente cerca del centro de dispersión. Por simplicidad, en los cálculos, algunos autores acostumbran a dejar constantes algunos términos de esta

expresión dependiendo del tipo de atmósfera trabajada. Estos coeficientes de Rayleigh son empleados para el cálculo del flujo dispersado por unidad de volumen. Si I_λ es la intensidad espectral del flujo incidente, entonces el flujo disperso por unidad de volumen $I_{\theta\lambda}$ se da por:

$$I_{\theta\lambda} = \beta_{\theta\lambda} I_\lambda \quad (2.12)$$

Como se puede observar en las ecuaciones (2.11) y (2.12) la dispersión del flujo radiante es inversamente proporcional al número de moléculas por unidad de volumen y a la cuarta potencia de la longitud de onda del flujo incidente (Slater, 1980).

2.4.2. Scattering de Mie

El Scattering de Mie También es dependiente de la longitud de onda, se presenta especialmente cuando hay choque con aerosol y polvo atmosférico. Se habla de dispersión Mie cuando existen partículas con un diámetro similar a la longitud de onda. La dispersión aerosol o Mie depende del tipo de aerosol, el tipo de aerosol depende de un índice de refracción y de la distribución del tamaño de las partículas. La dependencia de longitud de onda de la dispersión aerosol se puede expresar como:

$$\beta_A = \frac{c'}{\lambda^n} I_\lambda \quad (2.13)$$

Con c' como:

$$c' = \frac{2\pi^2}{H} [n(\lambda) - 1]^2 \quad (2.14)$$

Donde n típicamente se encuentra en el rango de 0.8 y 1.5 (Geosystems, 2000). Por lo tanto, la dispersión aerosol disminuye con la longitud de onda. Adicionalmente, el flujo dispersado tiene un fuerte pico en dirección delantera (Lira et al., 1983).

2.4.3. Dispersión no-selectiva

Se habla de dispersión No-Selectiva cuando existen partículas de gran tamaño. Este tipo de dispersión afecta por igual a las diferentes longitudes de onda. En consecuencia, las nubes o nieblas tienden a aparecer blancas ya que dispersan por igual toda la luz visible (Lira et al., 1983).

2.5. Influencia de la atmósfera en la teledetección

Como se comentó anteriormente, la radiación electromagnética se ve notablemente afectada por distintos componentes presentes en la atmósfera, como estos componentes dispersan o absorben en diferentes longitudes de onda (Figura 5) hacen difícil la observación remota de la superficie terrestre.

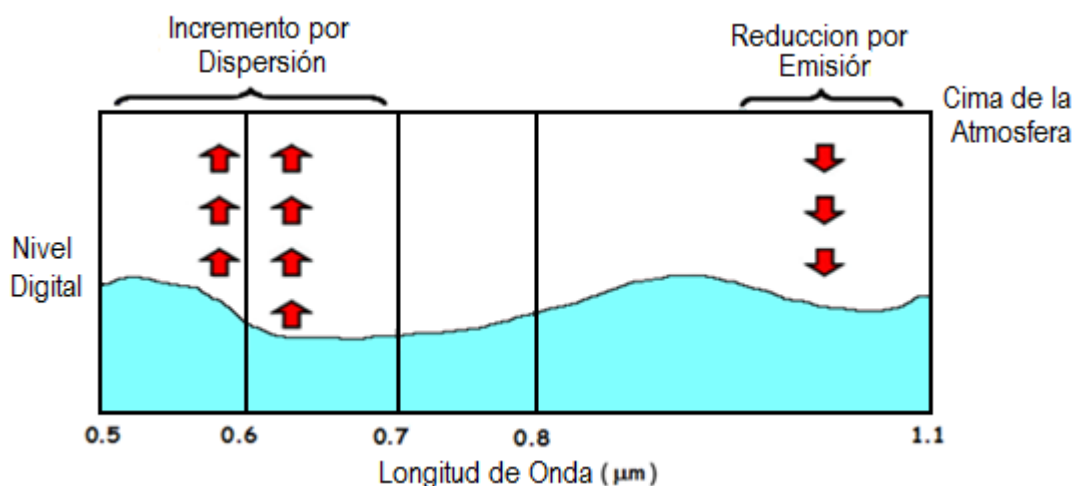


Figura 5. Efecto de la dispersión y absorción atmosférica (Adaptado de Jensen, 2004)

Es conveniente considerar que la radiancia detectada por los sensores está en función de los ángulos polar, azimutal y de elevación solar, para un intervalo en longitud de onda y un IFOV. La medida que hace el sensor involucra una radiación propia de la superficie terrestre, la emitancia espectral de la cubierta y una contribución por la absorción o dispersión de flujo radiante desde el Sol. Como se muestra en la Figura 6, el flujo de radiación electromagnética sufre una serie de procesos los cuales son: (A) Pérdida o escalaje de la cantidad e intensidad del flujo incidente. (B) Dispersión del flujo incidente en dirección de la superficie. (C) Dispersión del flujo incidente en dirección del campo de visión. (D) Dispersión del flujo reflejado en dirección del campo de visión. (E) Radiación emitida por otras cubiertas en dirección del campo de visión.

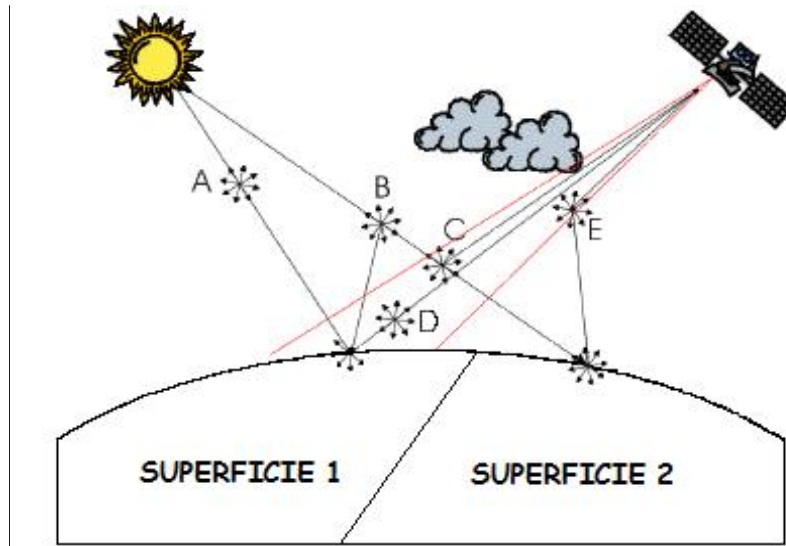


Figura 6. Papel de la atmósfera en teledetección (Adaptado de Slater, 1980)

Estos procesos están relacionados mediante la siguiente expresión:

$$L_{\text{sensor}} = L_{\text{superficie}}\epsilon + L_{\text{atmosfera}} \quad (2.15)$$

Donde L_{sensor} es la radiancia recibida por el sensor, $L_{\text{superficie}}$ es la radiancia emitida por la superficie, ϵ es la emisividad del suelo, y $L_{\text{atmosfera}}$ es la radiancia intrínseca de la atmósfera. Esta expresión es la correcta si se asumen superficies Lambertianas (Lira et al., 1983). La interacción de la atmósfera de la ecuación 2.15 incluye la dispersión, absorción de la radiación por gases, aerosoles y partículas en el medio atmosférico, es decir esta muestra una simplificación de la cual se puede observar que la radiancia verdadera de la superficie observada está afectada por el error provocado por la presencia de la atmósfera.

2.6. Principales componentes de la radiación electromagnética con influencia de la atmósfera.

Para el estudio de la corrección atmosférica, se acostumbra evaluar dos componentes relativas a la posición geográfica de la zona monitoreada. Los cuales están en función de la ubicación del sensor y del Sol con respecto a un punto P en el terreno. Estos componentes que son, la corrección por iluminación y el ángulo cenit del satélite la observación, se muestran en la Figura 7.

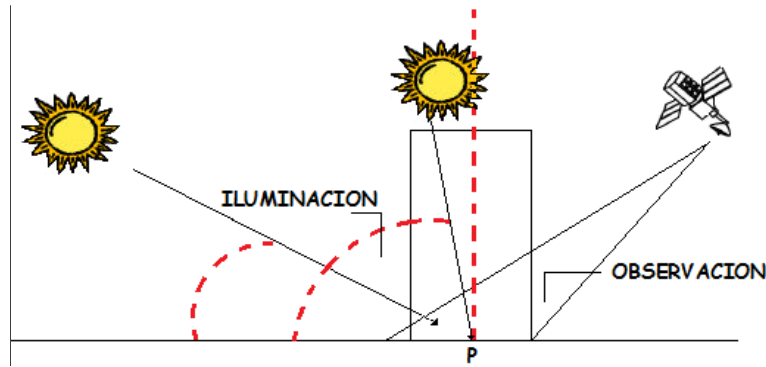


Figura 7. Componentes de la radiación

Cuando se trata del componente de iluminación, se habla de radiación solar incidente solo para sensores pasivos. La radiación solar es la energía emitida por el Sol que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Cuando se estudia la iluminación, se habla de irradiancia, cuando se analiza esta radiación en el sentido tierra-sensor se denomina radiancia, y cuando se analiza el cuerpo reflector se denomina reflectancia.

2.6.1. Irradiancia

Es la cantidad de energía radiada por el Sol por unidad de tiempo y área (sol-atmósfera-terreno). Integrando las magnitudes anteriores se obtiene que la irradiancia se expresa en energía por unidad de área. Suponiendo que sobre la cima de la atmósfera incide un haz de radiación solar con una intensidad (E), con una determinada dirección de iluminación al llegar al suelo puede descomponerse en tres componentes (Figura 8): irradiancia directa (E_{dir}), irradiancia difusa (E_{dif}), irradiancia del medio ambiente (E_{env}) (Frulla, 1992).

2.6.1.1 Irradiancia directa

Cuando se habla de irradiancia directa se acostumbra a utilizar el término E_{dir} , el cual se define como la radiación que llega a la superficie en forma de rayos de Sol sin cambio de dirección. Es decir, la irradiancia inicial tan solo sufre dentro de la atmósfera una atenuación pero el haz de radiación alcanza la superficie terrestre sin ser desviado (Frulla, 1992).

2.6.1.2 Irradiancia difusa

Esta componente corresponde a los haces de luz que son desviadas en su camino a la superficie por algún tipo de dispersión, pero que influyen en la radiación recibida por un punto en la superficie. Cuando se habla de irradiancia difusa, se denota como E_{dif} (Frulla, 1992).

2.6.1.3 Irradiancia del entorno

Se define este tipo de irradiancia como la radiación que sufre procesos de dispersión hacia atrás y alcanza una superficie vecina que está siendo observada por satélite. Como se ve en la Figura 8, estas regiones vecinas son denotadas como ρ_e y ρ_c , y además se observa que puede ocurrir que el haz reflejado permanezca atrapado por la atmósfera, este fenómeno es conocido como albedo atmosférico que puede representarse a través de albedos esféricos (Rahman y Dedieu, 1994), y por medio del anterior proceso alcanzar el punto P (Iqbal, 1983); esta irradiancia se denota como E_{env} . La superposición de estas tres componentes de irradiancia da como resultado la radiación solar global incidente sobre la superficie terrestre (Frulla, 1992).

$$E = E_{dir} + E_{dif} + E_{env} \quad (2.16)$$

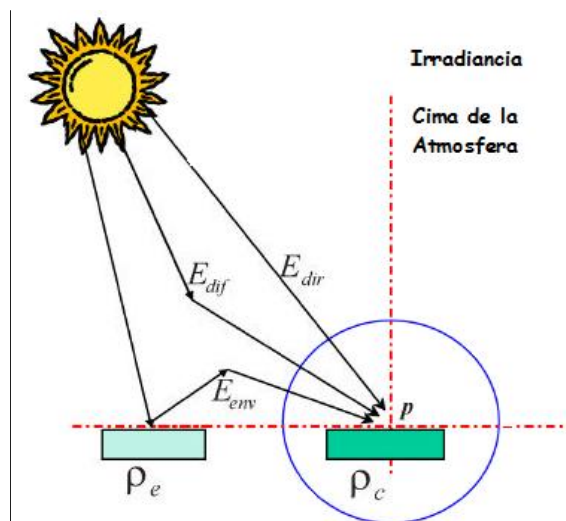


Figura 8. Componentes de la irradiancia (Slater, 1980)

2.6.2 Radiancia

Se denomina radiancia, a la radiación solar cuyo recorrido viene dado de la relación superficie – atmósfera- sensor. Esta magnitud es la más importante en teledetección, ya que un sensor o detector lo que registra, es la radiancia al nivel de sensor traducida en niveles digitales que dependen de la resolución radiométrica del mismo. Como se verá más adelante, el cálculo de la radiancia está en función de los coeficientes de calibración del sensor, sin embargo, para entender mejor este concepto se hace la siguiente consideración: La radiancia reflejada en un pixel depende en gran parte de la radiación total que incidió sobre dicho pixel (Frulla, 1992):

$$L = \rho_c \frac{E}{\pi} \quad (2.17)$$

En donde L es la radiancia y E se obtiene de la ecuación 2.16. Este resultado también dependerá de la dirección del flujo emitido desde la Tierra hacia el sensor, de lo cual se derivan tres tipos de radiancia que son mostrados en la Figura 9.

2.6.2.1 Radiancia directa (L_{pix})

La radiancia directa es aquella que llega a los detectores sin sufrir desviaciones con respecto a la dirección inicial, esta también llamada radiancia del pixel (Frulla, 1992).

2.6.2.2 Radiancia directa proveniente de la atmosfera (L_{atm})

Hace referencia a aquellos haces de luz que se encuentran atrapados en la atmósfera y de alguna forma radian en dirección del campo del sensor, esta radiancia directa proveniente de la atmosfera contribuye con información adicional que puede considerarse como error en la señal captada por el sensor (Frulla, 1992).

2.6.2.3 Radiancia proveniente del entorno (L_{env})

Se refiere a la radiación que es emitida por zonas vecinas al pixel observado en un instante de tiempo, muchos algoritmos de corrección atmosférica acostumbran corregir este efecto a través de filtros que teóricamente atenúan o resaltan el efecto de adyacencia (Frulla, 1992).

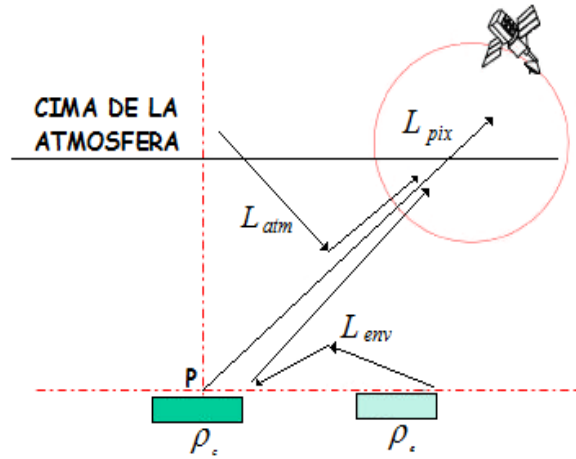


Figura 9. Componente de la radiancia (Frulla, 1992).

Al igual que en irradiancia la superposición de estas tres componentes da como resultado la radiancia total medida por el sensor y está notada por:

$$L_{\text{sensor}} = L_{\text{pix}} + L_{\text{atm}} + L_{\text{env}} \quad (2.18)$$

2.6.3 Reflectancia

La reflectancia es la razón entre la radiación reflejada y la incidente, se consideran dos tipos de reflectancia de interés cuando se habla de correcciones atmosféricas, la reflectancia en la cima de la atmósfera (TOA), también llamada reflectancia planetaria (ρ_p) y la reflectancia al nivel de la superficie (ρ_c) (Rahman y Dedieu, 1994). La reflectancia planetaria es la razón de la radiación solar reflejada por el sistema tierra-Atmósfera a la radiación solar incidente. Consideremos la geometría de la situación de la Figura 10. Se asume que una superficie lambertiana elemental, d_A , es irradiada por un flujo radiante incidente, E (Wm^{-2}) y que el flujo radiante reflejado, Φ , desde, dA , en cualquier dirección “ θ ” a la normal a la superficie es dado por la ecuación básica.

$$d^2\Phi = Ld\Omega dA \cos\theta \quad (2.19)$$

Donde, L es la radiancia (en Wm^2). El análisis de un campo de la radiación a menudo requiere de la consideración de la cantidad de energía radiante confinada a un elemento de

ángulo sólido. El ángulo sólido, Ω , es definido como la razón del área total, σ de una superficie esférica al cuadrado del radio de la esfera r . Esto puede ser escrito como

$$\Omega = \frac{\sigma}{r^2} \quad (2.20)$$

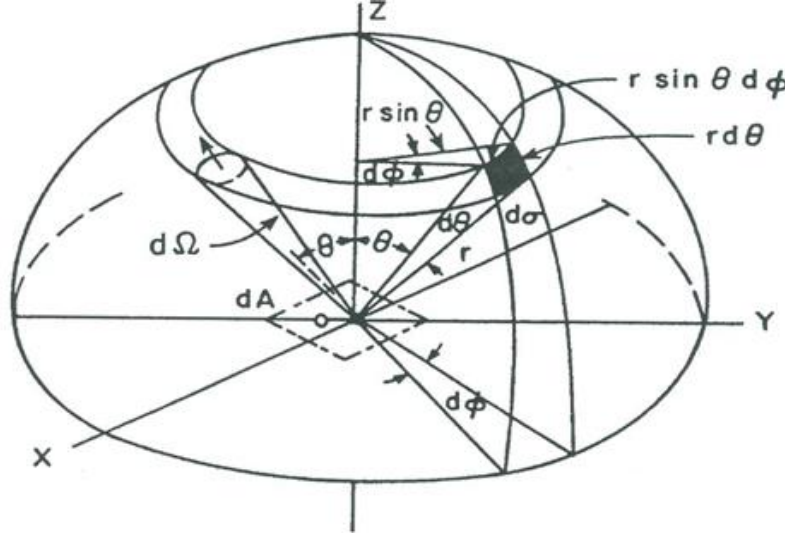


Figura 10. Reflexión difusa de una superficie lambertiana sobre un hemisferio (Smith et al., 1980)

Las unidades del ángulo sólido, Ω , son expresadas en términos del estereorradián (sr). Para una esfera cuya área superficial es $4\pi r^2$, su ángulo sólido es 4π sr. Para obtener un ángulo sólido elemental diferencial, construimos una esfera cuyo punto central es denotado como O. Asumiendo una línea a través del punto O que se mueve en el espacio y que intercepta una superficie arbitraria localizada a una distancia r desde el punto O, entonces, como es evidente en la Figura 10, el área diferencial $d\sigma$ en coordenadas esféricas es dado por

$$d\sigma = (r d\theta)(r \sin \theta d\phi) \quad (2.21)$$

Por lo tanto, el ángulo sólido diferencial es

$$d\Omega = \frac{d\sigma}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.22)$$

Donde θ y ϕ denotan los ángulos cenital y acimutal, respectivamente, en coordenadas polares. El flujo radiante total reflejada en el hemisferio, $d\Phi_h$ está dado por

$$d\Phi_h = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} L dA \cos \theta \sin \theta d\phi = \pi L dA \quad (2.23)$$

Donde el subíndice h representa el hemisferio total. Luego, la reflectancia difusa ρ , de la superficie es.

$$\rho = \frac{d\Phi_h}{d\Phi_i} = \frac{\pi L dA}{E dA} = \pi \frac{L}{E} \quad (2.24)$$

La cantidad πL es la densidad de flujo radiante reflejado desde la superficie, que es equivalente a la excitación radiante M de la fuente auto emisora, o expresado de otra forma, la razón $d\Phi_h/d\Phi_i$ es la excitación radiante de una superficie Lambertiana. Por consiguiente, de la ecuación (2.24)

$$M = \pi L \quad (2.25)$$

En el caso general, la radiancia L , de la superficie es una función del ángulo θ y el ángulo acimutal ϕ , es decir $L(\theta, \phi)$ en donde esta radiancia es la recibida por el sensor. Entonces la ecuación (2.24) se hace.

$$\rho = \frac{d\Phi_h}{d\Phi_i} = \frac{1}{E dA} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} L(\theta, \phi) dA \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi = \rho_p \quad (2.26)$$

La ecuación (2.25), no puede ser resuelta hasta que conozcamos la dependencia de la radiancia L , con θ y ϕ . Muchas superficies naturales muestran características lambertianas con $\theta = 40^\circ$, y algunas (tales como la nieve y el desierto) son lambertianas hasta cerca de $\theta = 50^\circ$, o $\theta = 60^\circ$, .Sin embargo, aún bajo la geometría más restringida de observaciones del satélite LANDSAT, la aproximación a condiciones lambertianas no siempre es posible (Smith et al., 1980). Existen muchas superficies que salen significativamente del caso Lambertiano para θ superior a unos 60° . Muchas superficies naturales muestran poco cambio en la radiancia con el acimut, ϕ . En la ecuación (2.25), E es la irradiancia Extraterrestre Solar. Pero la radiación que llega del sol está sometida a diferentes variaciones, alguna de ellas debida a procesos internos del sol, tales como la actividad de las manchas solares. Este tipo de variación no se tiene en cuenta a efectos de la constante solar. Sin embargo, la oscilación de la distancia Sol – Tierra, a lo largo del año, como se ve en la Figura 55 del anexo 1, produce la consiguiente alteración en el valor de la constante solar. De esta forma, la radiación que llega al exterior de la atmosfera es (Slater, 1980):

$$E = E_0 \varepsilon_0 \quad (2.27)$$

Donde ε_0 es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita de la tierra y viene dado por la ecuación 2.28.

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = \frac{1}{d^2} \quad (2.28)$$

La radiación solar que llega al exterior de la atmosfera sobre una superficie plana, en función de la altura del sol, α , será por lo tanto

$$E = \varepsilon_0 E_0 \text{Sen} \alpha = \varepsilon_0 E_0 \text{Cos} \theta \quad (2.29)$$

Luego, la reflectancia planetaria, ρ_p , es dada por la siguiente expresión:

$$\rho_p = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} L(\theta, \phi) \text{Cos} \theta \text{Sen} \theta d\theta d\phi}{\varepsilon_0 E_0 \text{Cos} \theta} \quad (2.30)$$

En general, la dependencia de $L(\theta, \phi)$, con θ y ϕ es muy poco conocido, y por consiguiente, en la ausencia de modelos angulares teóricos satisfactorios o resultados observados, se asume la isotropía, es decir, $L(\theta, \phi) = L$ y por lo tanto

$$\rho_p = \frac{\pi L d^2}{E_0 \text{Cos} \theta} \quad (2.31)$$

PLATAFORMAS SATELITALES Y SENSORES

Los sistemas o dispositivos de sensores remotos pueden recibir radiación electromagnética proveniente de la superficie de la Tierra en cualquier rango de longitudes de onda. Sin embargo, por razones técnicas y atmosféricas, los rangos más utilizados para usos de recursos naturales son de 0,4 a 0,13 micrones y entre 30 y 300 milímetros. Los sensores se pueden clasificar según el origen, la categoría y tipo de radiación en sensores activos o pasivos, Figura 11 (Perez, 2007).

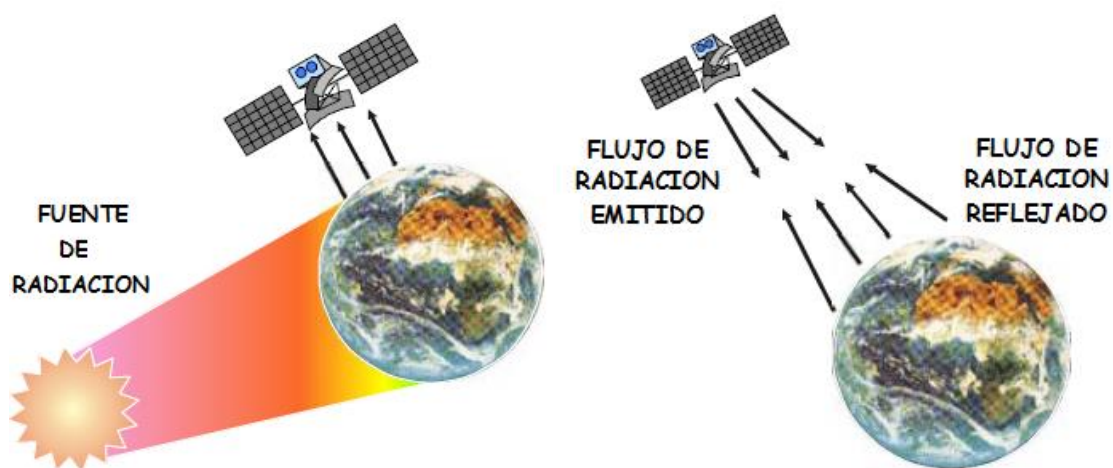


Figura 11. Sensor pasivo y sensor activo (Perez, 2007).

3.1 Características generales del satélite TERRA

El satélite TERRA fue lanzado el 18 de diciembre de 1999 como parte del programa Earth Observing System (EOS) de la NASA, y tiene por objetivo principal adquirir datos que nos permitan aumentar nuestros conocimientos sobre la dinámica global de la atmósfera, la interacción tierra, océano y atmósfera. Los sistemas de observación de la Tierra, son una serie de plataformas espaciales que orbitan alrededor de la Tierra destinadas a registrar múltiples parámetros biológicos, físicos y químicos de la Tierra. Una de las características más importante del satélite, es el tipo de órbita que esta describe. La órbita que sigue este satélite, es polar y Helio - sincrónica. Estas dos características son llamadas de esta manera como consecuencia del tipo de movimiento que realiza el satélite en torno a la Tierra. Se le denomina polar porque su plano es

prácticamente paralelo al eje de rotación terrestre con un inclinación de $98.2^{\circ} \pm 0.15^{\circ}$, respecto al ecuador terrestre, es decir el satélite da vueltas de polo a polo, de forma que es la Tierra la que al girar hace que aquel vaya cubriendo progresivamente a lo largo de su vuelo toda la superficie terrestre, Tabla 5. Una característica muy importante en la obtención de parámetros de la superficie terrestre es la geometría de la iluminación solar. Es por ello que los satélites sobrevuelan el mismo punto de la Tierra a la misma hora. En este estudio, se ha tomado en cuenta al satélite TERRA que está orbitando a una altura promedio de 705 km desde la superficie de la Tierra, y además porque este satélite examina las condiciones climáticas de la Tierra orbitando de polo a polo (Abrams, 1998).

Tabla 5. Características del Satélite TERRA (Abrams, 1998).

Misión	Earth Observing System (EOS)
Institución Responsable	NASA
País / Región	Estados Unidos
Satélite	TERRA
Lanzamiento	18/12/1999
Situación Actual	Activo
Órbita	Polar e heliosíncrona
Altitud	705 km.
Inclinación	98,2°
Tiempo de Duración de la orbita	98,1 min.
Horario de Paso	10:30 A.M.
Período de Revisita	16 días
Sensores	ASTER, MODIS, MISR, CERES e MOPIT

3.1.1 Sensores a bordo del satélite TERRA

ASTER (Radiómetro espacial de emisión y reflexión térmica avanzado), proporciona imágenes en alta resolución de la superficie del suelo, agua, hielo y nubes utilizando tres subsistemas de sensores que cubren 14 bandas espectrales desde el visible hasta el infrarrojo térmico (Abrams, 1998).

CERES (Medidor de nubes y del sistema de radiación de Energía de la Tierra), mide el balance de radiación de la Tierra y la radiación atmosférica de la cima de la atmósfera usando un radiómetro de barrido de banda ancha (Abrams, 1998).

MISR (Radiómetro espectral con imágenes multiangulares), mide las funciones de reflectancia angular de la cima de la atmósfera, nubes y superficie, y mide la función de reflectancia bidireccional de la superficie (BRDF), aerosol y propiedades de la vegetación usando 4 bandas espectrales en cada una de sus nueve cámaras orientadas en diferentes ángulos (Abrams, 1998).

MODIS (Radiómetro espectral con imágenes de resolución moderada), mide los procesos biológicos y físicos en el suelo y el océano usando un radiómetro de barrido multiespectral con 36 bandas espectrales desde el visible al infrarrojo térmico. Con estos instrumentos se puede medir la temperatura de la superficie terrestre, composición de la nieve y el suelo, identificación de minerales, albedo aerosoles atmosféricos, evapotranspiración y un sin fin de características de la vegetación (Abrams, 1998).

MOPIT (Mediciones de la contaminación en la troposfera), mide los perfiles verticales de monóxido de carbono y posiblemente el metano en la troposfera usando correlación espectroscópica con celdas de gas moduladas por presión y moduladas por longitud (Abrams, 1998).

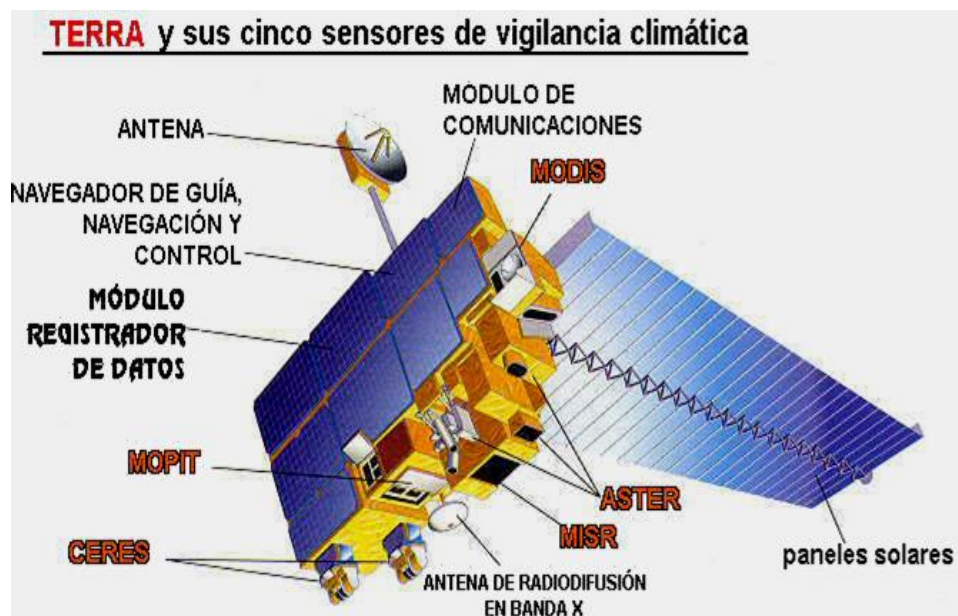


Figura 12. Satélite TERRA y sus 5 sensores de monitoreo de la Tierra (Abrams, 1998).

3.1.2 Características del sensor ASTER

El sensor ASTER tiene 3 subsistemas que registran datos simultáneamente de las regiones del espectro correspondiente al visible e infrarrojo cercano (VNIR), infrarrojo

medio o de onda corta (SWIR) y del infrarrojo termal (TIR). El VNIR tiene 3 bandas con 15 metros de resolución espacial; SWIR registra 6 bandas con 30 metros de resolución espacial; y TIR tiene 5 bandas con 90 metros de resolución espacial, Tabla 6. Además de alta precisión geométrica y radiométrica, es posible obtener pares estereoscópicos a lo largo del camino orbital. La resolución temporal es cada 16 días, pero en caso de emergencias (volcanes, inundaciones, incendios, etc.), pueden programarse registros de datos sobre el área afectada cada 2 días, mediante giros laterales del sensor de hasta 24° en el VNIR. El ancho de barrido de ASTER es de 60 km (Abrams, 1998).

Tabla 6. Características Generales del sensor ASTER (Abrams, 1998).

Sub-sistema	Banda N°	Rango espectral (μm)	Resolución espacial
VNIR	1	0.52-0.60	15m
	2	0.63-0.69	
	3N	0.78-0.86	
	3B	0.78-0.86	30m
SWIR	4	1.60-1.70	30m
	5	2.145-2.185	
	6	2.185-2.225	
	7	2.235-2.285	
	8	2.295-2.365	
	9	2.360-2.430	
TIR	10	8.125-8.475	90m
	11	8.475-8.825	
	12	8.925-9.275	
	13	10.25-10.95	
	14	10.95-11.65	

Si bien las características de los datos ASTER son aplicables al estudio de todos los recursos naturales, se puede decir que los recursos geológico mineros han sido considerados en particular. Las capacidades espectrales, radiométricas y geométricas del sensor ASTER (Figura 13) permiten, identificación de áreas de alteración, distribución precisa de óxidos de hierro, de diferentes minerales de alteración, de rocas con diferentes contenido de sílice y producir un modelo digital de terreno; además se puede realizar el monitoreo de áreas de erosión y sedimentación costera y seguimiento de áreas volcánicas, entre otras aplicaciones (Abrams, 1998).

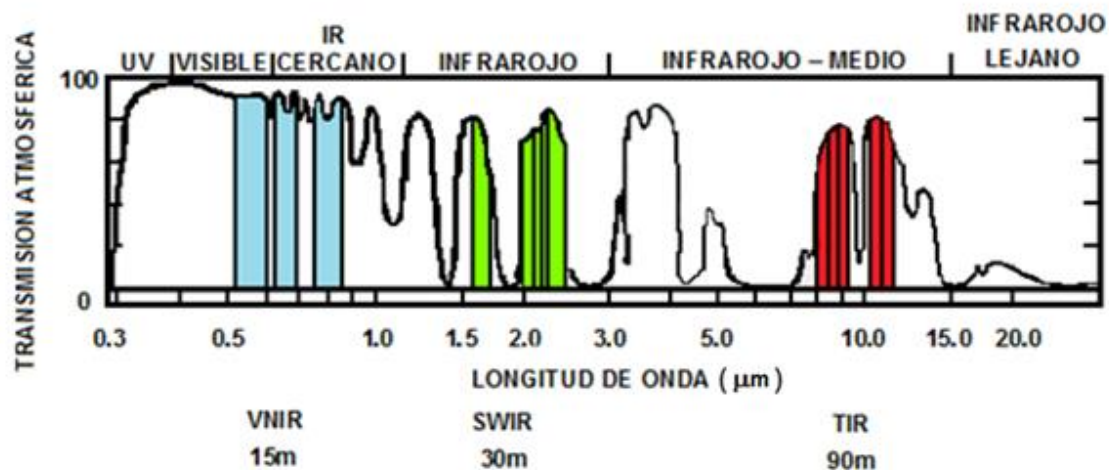


Figura 13. Bandas espectrales del sensor ASTER (Abrams, 1998).

3.2 Características generales de los satélites LANDSAT

Gracias a los brillantes resultados que proporcionaron las primeras fotografías espaciales, la agencia espacial norteamericana (NASA) diseñó a finales de los años 60 el primer proyecto dedicado exclusivamente a la observación de los recursos terrestres. Fruto de estos trabajos fue la puesta en órbita del primer satélite de la serie ERTS (“Earth Resource Technology Satellite”) el 23 de Julio de 1972. Esta familia de satélites fue rebautizada como Landsat a partir del segundo lanzamiento, en 1975 (Landsat 2). Entre los satélites de recursos, el programa Landsat puede considerarse el más fructífero puesto que ha proporcionado datos multiespectrales de alta resolución a una amplia gama de usuarios durante más de 25 años, lo que representa el registro más largo de información sobre la superficie terrestre obtenido de forma global y repetitiva desde el espacio. A mediados de los 80 del siglo XX, el programa Landsat entra en una nueva etapa en cuanto a financiación y funcionamiento con la transferencia del programa al sector privado. En 1985 la compañía EOSAT recibe los derechos para vender productos Landsat por un período de 10 años con el compromiso de participar en el desarrollo de futuros sensores. El gobierno mantenía la responsabilidad en el control físico de la plataforma y se comprometía a colaborar en el desarrollo de los Landsat 6 y 7. Recortes presupuestarios pusieron en entredicho este compromiso y se temió por la continuidad de los Landsat. Ante las presiones de la comunidad científica y profesional, en 1992 una nueva ley, devuelve la gestión del programa al gobierno y se adquieren compromisos para una financiación estable que asegure la continuidad del Landsat 6 y 7 en los 90. El Landsat 6 se lanzó en 1993 pero por fallos de comunicación con la

plataforma no se ubicó en la órbita precisa y se perdió. Este fracaso y el dudoso éxito de la gestión privada hizo temer por el futuro de estos satélites. No obstante, se inicia el proyecto Landsat 7 bajo un programa en el que participan 3 agencias: la NASA es responsable del desarrollo y lanzamiento del satélite y del sector de tierra, la NOAA se encarga de su operación y mantenimiento durante todo el tiempo de vida del satélite, y la USGS recoge, procesa y distribuye los datos y se encarga de mantener el archivo de datos. Este proyecto ha culminado con el lanzamiento en 1999 del Landsat 7, que se espera tenga una vida de cinco años. El Landsat 7 parece abrir nuevas expectativas en la distribución y comercialización de los datos con el abaratamiento de los productos y el consiguiente acceso a un mayor número de usuarios (Williams, 2004).

3.2.1 Características orbitales de la serie de satélites LANDSAT

Los primeros tres satélites de la serie LANDSAT 1, 2 y 3 tenían unas características similares. El peso total del sistema se aproximaba a los 960 kg. Su órbita era heliosíncrona, pasa por el mismo lugar a la misma hora, polar, ligeramente inclinada (99.1 grados). Con una altura orbital media de 917 km, circundaba la Tierra cada 103 minutos, con lo que realizaba 14 órbitas diarias para volver sobre la misma porción de la superficie terrestre a los 18 días, y a la misma hora local (entre 9:30 y las 10:30 según latitudes). Con el fin de reducir al máximo las alteraciones en las condiciones de observación, se dotó a los satélites de un sistema de estabilización según tres ejes, orientados hacia la superficie terrestre y la vertical del punto nadir. Las correcciones en la órbita, por tanto, se hacían desde las estaciones terrestres, lo que confería una gran estabilidad en la toma de datos. Los satélites de la serie LANDSAT 4, 5 y 7 modificaron su forma y sus características orbitales. La altura de vuelo se reduce de 917 a 705 Km, aunque se mejora el ciclo de recubrimiento, de 18 a 16 días, gracias a su menor periodo orbital. Sin embargo, el momento de adquisición se mantiene en torno a las 9:45 hora local en nuestras latitudes (Williams, 2004).

3.2.2 Sensores a bordo de la serie de satélites LANDSAT

En lo que a equipamiento se refiere el programa LANDSAT puede ser estructurado en 3 generaciones. Una primera fase constituida por los Landsat 1, 2 y 3 cuyo equipamiento estaba formado por un explorador de barrido multiespectral MSS (Multispectral Scanner) y un conjunto de tres cámaras vidicon RBV ("Return Beam Vidicon"). Los satélites de la segunda generación Landsat 4 y 5 mantienen el sensor MSS para

garantizar la continuidad de los datos anteriores, eliminan las cámaras RBV e incorporan un nuevo sensor denominado TM (Thematic Mapper) diseñado para la cartografía temática que proporciona datos de mayor resolución espacial, espectral y radiométrica. Con el lanzamiento del Landsat 7 (ya que el 6 no llegó a funcionar) se entra en una versión mejorada de la segunda generación con la incorporación de una versión actualizada del TM denominado ETM (Enhanced Thematic Mapper). En los siguientes apartados vamos a resumir las características más importantes de cada uno de estos sensores. La Tabla 7 muestra un resumen de la información más relevante de cada uno de los satélites que conforma la serie Landsat (Williams, 2004).

Tabla 7. Características Generales de la serie LANDSAT (Williams, 2004).

Satélite	Lanzamiento (fin servicio)	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Sensor	Banda: intervalo espectral (µm)	Resolución espacial (m)
Landsat 1	23/07/72 06/01/78	917	18	RBV	(1) 0.48 0.57 (2) 0.58 0.68 (3) 0.70 0.83	80 80 80
				MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1	79 79 79 79
Landsat 2	22/01/75 25/02/82	917	18	Idéntico al Landsat 1		
Landsat 3	05/03/78 31/03/83	917	18	RBV	(1) 0.5 0.75	40
				MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1 (8) 10.4 12.6	79 79 79 79 240
Landsat 4	18/07/82 (83)	705	16	MSS	(4) 0.5 0.6 (5) 0.6 0.7 (6) 0.7 0.8 (7) 0.8 1.1	82 82 82 82
				TM	(1) 0.45 0.52 (2) 0.52 0.60 (3) 0.63 0.69 (4) 0.76 0.9 (5) 1.55 1.75 (6) 10.4 12.5 (7) 2.08 2.35	30 30 30 30 30 120 30
Landsat 5				Idéntico al Landsat 4		
Landsat 6	05/10/93 05/10/93	705	16	Fallos en el sistema		
Landsat 7	15/04/99	705	16	ETM+	(1) 0.45 0.52	30
					(2) 0.53 0.61	30
					(3) 0.63 0.69	30
					(4) 0.78 0.9	30
					(5) 1.55 1.75	30
					(6) 10.4 12.5	120
					(7) 2.09 2.35	30
					PAN 0.5 0.90	15

3.2.3 Características de los sensores TM y ETM+

En la segunda generación del programa Landsat se introdujo un nuevo tipo de sensor, denominado Thematic Mapper (TM), diseñado para la cartografía temática. Al igual que su predecesor, el MSS, el Thematic Mapper es un equipo de barrido multiespectral. Frente al MSS, el TM aumenta el número de detectores, de 24 a 100, a la vez que se reduce el IFOV, se aumenta los niveles de codificación y se realiza el barrido en dos direcciones. Todo ello le permite mejorar la resolución espacial, espectral y radiométrica: de 79 a 30 m, de 4 a 7 bandas, y de 6 a 8 bits. En el TM, cada oscilación del espejo supone 16 líneas de barrido, frente a 6 en el MSS. De esta forma se precisan 16 detectores por banda, salvo la banda térmica que registra una menor resolución (120 m) y solo requiere cuatro detectores. Este aumento en el número de detectores complica el proceso de calibración, a la par que aumenta el volumen de datos a procesar (6 veces superior al MSS). Los detectores están formados por tubos de silicio, para las bandas 1 a 4, indio-antimonio para las bandas 5 y 7, y mercurio-cadmio-telurio para la banda 6. El diseño del TM pretendió paliar las deficiencias observadas en las imágenes MSS, incorporando información de cuatro bandas del espectro no contempladas en el MSS (azul, dos en el infrarrojo medio y una en el térmico), mientras se sustituían las bandas 6 y 7 del sensor, ambas en el infrarrojo cercano, por una sola. Con esta nueva configuración, los Landsat de segunda generación permitieron una sensible mejora en las aplicaciones terrestres y marinas sobre el sensor MSS: detección de turbideces y contaminantes en el agua (banda azul), exploración minera (infrarrojo medio), contenidos de humedad en las plantas y suelo (infrarrojo medio), detección de focos de calor (infrarrojo medio y térmico) además de mantener las ya existentes para el MSS. Por la parte de los inconvenientes de este sensor frente al MSS fue su coste y el gran volumen de datos que se generaban. A modo de ejemplo, una sola imagen del TM era 6 veces más cara que una adquirida por el MSS (sobre el mismo territorio). Por otro lado la cantidad de datos suponía 231 millones de píxeles, frente a los 28 millones de una imagen MSS, lo que para la época suponía un problema ya que se precisaban computadoras de elevadas prestaciones para poder manipularlas. En la actualidad el Landsat 7 está equipado con una versión mejorada del TM denominado ETM+ (“Enhanced Thematic Mapper”) (Williams, 2004).

CAPÍTULO 4

DATOS

4.1. Ubicación del área de estudio

Las áreas de estudio fueron San Antero, La Viña, Saltur y Ucupe ubicadas en los distritos de Cayalti, Nueva Arica y Zaña, respectivamente. Ellos se encuentran en la cuenca de Zaña de la provincia de Chiclayo, región de Lambayeque, con proyección UTM, Zona 17S y WGS-84. El centro del área de estudio de La Viña se encuentra localizada aproximadamente entre las coordenadas geográficas 6°54'19"S, 79°29'29.70"W, el área de San Antero 6°54'35"S, 79°32'14.81"W, el área de Saltur en 6°49'34"S, 79°36'4.34"W, y el área de Ucupe en 6°57'59"S, 79°38'25.57"W. las áreas de estudio son mostrados en la Figura 14.

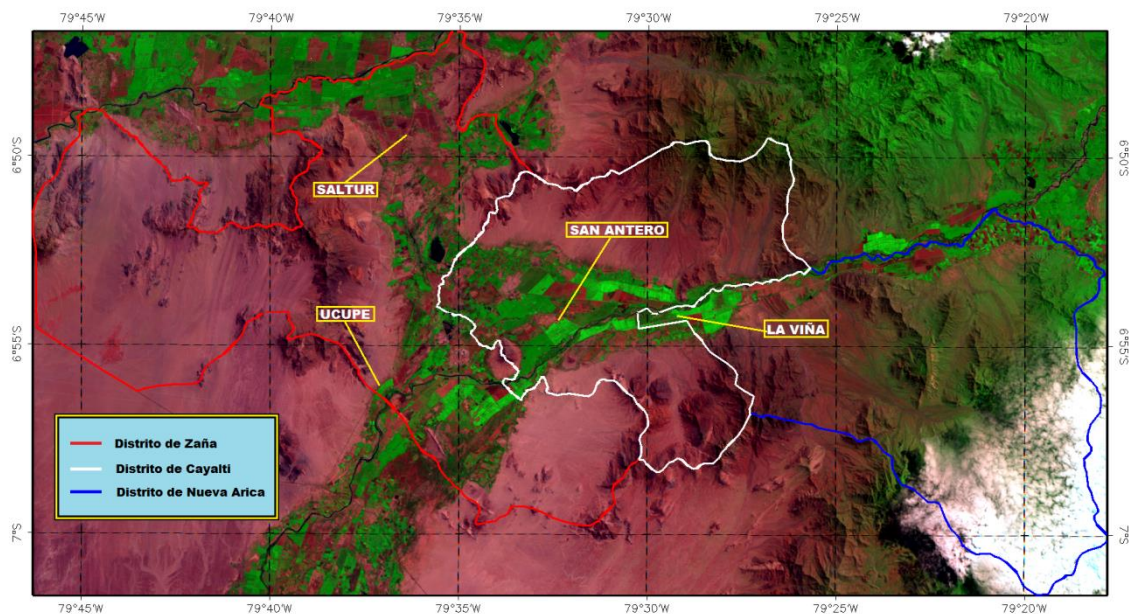


Figura 14. Ubicación de las áreas de estudio

4.2. Adquisición de los datos de conductividad eléctrica del suelo

En las áreas de estudio se ubicó puntos de muestreo debidamente georeferenciados con la ayuda de un GPS en el sistema WGS 84. Se extrajo las muestras de suelo de 0.0 - 0.30 m de profundidad, con aproximadamente 1 kilogramo por muestra; las mismas que fueron recogidas en bolsas de polietileno etiquetadas; y luego trasladadas al laboratorio

de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo (UNPRG), en donde se determinó la Conductividad Eléctrica del suelo. Antes de proceder a realizar el análisis de Conductividad Eléctrica del suelo, se procedió a una preparación previa, que consiste en las siguientes operaciones:

a) Las muestras fueron sacadas de su contenedor (bolsa plástica) y tendidas a la intemperie durante 2 días. b) Una vez seco el material se desmenuzó, deshaciendo los terrones con ayuda de un mortero hasta obtener un material de aspecto homogéneo. c) Las muestras se hicieron pasar a través de un tamiz (malla N°10) de 10 mm de luz, de esta forma se separaron grava, piedras y trozos de vidrio; componentes que usualmente no deben suponer más del 1% de la masa total. d) Las muestras ya tamizadas se recogieron en nuevas bolsas plásticas por separado cada una debidamente etiquetadas, luego se trasladaron al laboratorio de suelos para los análisis correspondientes.

Del área de La Viña, se extrajo un total de 54 muestras (Anexo 2): 24 muestras el 14 de diciembre del 2007 y 30 muestras el 26 de enero del 2008. Del área de San Antero, se extrajeron un total de 28 muestras (Anexo 2) el 23 agosto del 2008. Para el área de Saltur se extrajeron un total de 24 muestra (ver Anexo 2) el 23 de Agosto del 2008. Por último para, el área de Ucupe se extrajeron un total de 25 muestras (Anexo 2) el 23 de Agosto del 2008.

4.3. Adquisición de las imágenes de satélite

Para las áreas de estudio, se adquirieron cuatro imágenes, una imagen ASTER del satélite TERRA con fecha 20 de Noviembre del 2007 y tiempo (TU) de barrido, del centro de la escena 15:45:23 (TL: 10h 45min y 23s) fue obtenida de la NASA - USA. Con paralelo sur 7°20'2.57"S, paralelo norte 6°41'44.21"S, meridiano este 79°15'55.58"W, meridiano oeste 79°56'27.57"W. El tamaño del marco es de 5063 pixeles por 4724 líneas para las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9. Las nueve bandas de la imagen ASTER fueron usadas en la presente tesis. El formato de la imagen es HDF, el tamaño del pixel es de 15 m x 15 m. En el tiempo del sobrepaso del satélite la posición del Sol con relación al centro de la escena tuvo un ángulo de elevación de 67.127° y un ángulo acimut de 125.556°.

Una imagen del sensor TM del satélite Landsat-5 (marco 10-65) con fecha 6 de Mayo del 2008 y tiempo (TU) de barrido, del centro de la escena 15:17:01(TL: 10h 17min y 01s) fue cortesía de U.S. Geological Survey. Con paralelo sur 8°8'8.34"S, paralelo norte 6°19'35.80"S, meridiano este 79°19'32.88"W, meridiano oeste 80°42'26.64"W. El tamaño del marco es de 8067 pixeles por 6747 líneas para las bandas 1, 2, 3, 4, 5, y 7. En el tiempo del sobrepaso del satélite la posición del Sol con relación al centro de la escena tuvo un ángulo de elevación de 51.907° y un ángulo acimut de 50.712°. Las seis bandas TM reflectivas fueron usadas. El formato de la imagen es GEOTIFF, el tamaño del pixel es de 30 m x 30 m.

Una imagen del sensor ETM+ del satélite Landsat-7 (marco 10-65) con fecha de adquisición 22 diciembre del 2007 y tiempo (TU) de barrido del centro de la escena 15:18:37.6 (TL: 10h 18min y 37.6s), fue cortesía de U.S. Geological Survey. El tamaño del marco es de 8261 pixeles por 7001 líneas para las bandas 1, 2, 3, 4, 5, y 7. En el tiempo del sobrepaso del satélite la posición del Sol con relación al centro de la escena tuvo un ángulo de elevación de 56.809° y un ángulo acimutal de 122.616°. Las seis bandas ETM+ reflectivas fueron usadas. El formato de la imagen es GEOTIFF, el tamaño del pixel es de 30 m x 30 m y la proyección es UTM 17S. El datum y elipsoide de referencia es WGS84. Las coordenadas UTM 17S del área de estudio según la NASA son: esquina izquierda superior 480000 m, -694200 m, esquina derecha superior 727800 m, -694200 m, esquina izquierda inferior 480000 m, -904200 m, esquina derecha inferior 727800 m, -904200 m.

Una imagen del sensor ETM+ del satélite Landsat (marco 10-65) con fecha de adquisición 08 de febrero del 2008 y tiempo (TU) de barrido del centro de la escena 15:18:36.0980962Z (TL:10h 18min y 36.1s), fue cortesía de U.S. Geological Survey. El tamaño del marco es de 8261 pixeles por 7011 líneas de las bandas 1, 2, 3, 4, 5, y 7. En el tiempo del sobrepaso del satélite la posición del Sol con relación al centro de la escena tuvo un ángulo de elevación de 55.721° y un ángulo acimutal de 106.154°. Las seis bandas ETM+ reflectivas fueron usadas. El formato de la imagen es GEOTIFF, el tamaño del pixel es de 30 m x 30 m y la proyección es UTM 17S. El datum y elipsoide de referencia es WGS84. Las coordenadas UTM 17S del área de estudio según la NASA son: esquina izquierda superior 484200 m, -694500 m, esquina derecha superior 732000 m, -694500 m, esquina izquierda inferior 484200 m, -904800 m, esquina

derecha inferior 732000 m, -904800 m. En la tabla 8 se muestra la descripción de las imágenes utilizadas.

Tabla 8. Descripción de los datos imágenes utilizados

Satélite	Sensor	Fecha de Adquisición	Hora de Adquisición	Ángulo de Elevación	Ángulo Acimut
Terra	ASTER	2007-11-20	15:45:23	67.127	125.556
Landsat 5	TM	2008-05-06	15:17:02	51.907	50.712
Landsat 7	ETM +	2008-02-08	15:18:36	55.721	106.154
Landsat 7	ETM +	2007-12-22	15:18:37	56.809	122.616

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y PRE-PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

5.1 Calibración radiométrica de la imagen ASTER level-1A

Los datos “Level 1A” contiene números digitales (ND) cuantizados como enteros de 8 bits y está en un archivo HDF. Cada archivo contiene una escena completa de datos imagen obtenida a partir de los datos “level-0” y corregidos por el alineamiento de los detectores SWIR y TIR. Además, incluye también los coeficientes radiométricos, geométricos y las tablas de corrección de la paralaje SWIR, datos suplementarios del satélite, datos del satélite, y los valores calculados para la cubierta nubosa. Todos estos datos se encuentran almacenados junto con los metadatos, SDS, etc., en un sólo archivo HDF. Para convertir los ND a Radiancia, se usan los valores de “Slope/Inclination (A), Gain (G) y Offset (D)” de los valores de la tabla de los Coeficientes de Calibración Radiométrica (RCC = “Radiometric Conversion Coefficients”) que son adicionados en el archivo HDF (Abrams, 1998). Los Números Digitales de la imagen ASTER fueron convertidos a radiancia usando las ecuaciones (5.1) y (5.2).

$$L_{\text{VNIR,SWIR}} = \left(\frac{A}{G} \right) \text{ND} + D \quad (5.1)$$

$$L_{\text{TIR}} = A(\text{ND}) + C(\text{ND})^2 + D \quad (5.2)$$

Donde:

$L_{\text{VNIR,SWIR}}$ y L_{TIR} : Radiancia espectral ($\text{W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$)

A: Coeficiente de corrección lineal

C: Coeficiente de corrección no lineal

G: “Gain”

D: “Offset”

ND: Número Digital para cada pixel de la imagen

5.2 Calibración radiométrica de las imágenes TM y ETM+

Las imágenes obtenidas de los sensores TM y ETM+ contiene números digitales (0 a 255). Estos valores están relacionados directamente con la radiancia. La conversión de

los números digitales (ND) de una imagen a radiancia (L) está dado por la ecuación (Markhan y Barker, 1986):

$$ND = \left(\frac{ND_{max}}{L_{max} - L_{min}} \right) \times (L - L_{min}) \quad (5.3)$$

$$L = \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{ND_{max}} \right) \times ND + L_{min} \quad (5.4)$$

Donde:

L: Radiancia ($W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$)

ND: Número digital para cada pixel de la imagen

L_{max}, L_{min} : Constantes de Calibración

ND_{max} : Número digital máximo de la imagen

Como el Número Digital del pixel es una transformación lineal simple de la radiancia, la pendiente y el intercepto de esta transformación lineal (que es específico para cada banda espectral, cada sensor y calibración inicial) puede ser usado para calcular la radiancia L (medido en $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$) usando la ecuación (5.4) e inversamente usado para calcular el ND del pixel, usando la ecuación (5.3). Los valores de ganancia y compensación son únicos para cada banda espectral adquirida para un sensor particular. Esos valores cambian sobre el intervalo de vida de un sensor, así los valores más recientes son usados. Para el TM y ETM+, esos valores están disponibles a los usuarios con el conjunto de datos, Tablas 9 y 10. Los Números Digitales de las imágenes TM y ETM+ fueron convertidos a radiancia espectral usando la ecuación (5.5) en el lenguaje de programación IDL.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) \times (ND - Q_{calmin}) + L_{min} \quad (5.5)$$

Donde:

L_{λ} : Radiancia espectral ($W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$)

ND: Número digital para cada pixel de la imagen

L_{max}, L_{min} : Constantes de Calibración

Q_{calmax} : Rango más alto de radiancia reescalada en ND

Q_{calmin} : Rango más bajo de radiancia reescalada en ND

Tabla 9. Los valores máximos y mínimos de radiancia del sensor TM (Gyanesh et al., 2009).

TM / LANDSAT-5				
Banda	Rango espectral (μm)	L_{\min} ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$)	L_{\max} ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$)	E_0 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$)
1	0.452 – 0.518	-1.52	193	1983
2	0.528 – 0.609	-2.84	365	1796
3	0.626 – 0.693	-1.17	264	1536
4	0.776 – 0.904	-1.51	221	1031
5	1.567 – 1.784	-0.37	30.2	223.0
6	10.45 – 12.42	1.2378	15.3032	N/A
7	2.097 – 2.349	-0.15	16.5	83.44

Tabla 10. Los valores máximos y mínimos de radiancia del sensor ETM+ (Gyanesh et al., 2009).

ETM+ / LANDSAT-7				
Banda	Rango espectral (μm)	L_{\min} ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$)	L_{\max} ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$)	E_0 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$)
1	0.452–0.514	-6.2	293.7	1997
2	0.519 – 0.601	-1.52	300.9	1812
3	0.631 – 0.692	-5.00	234.4	1533
4	0.772 – 0.898	-5.10	241.1	1039
5	1.547 – 1.748	-1.00	47.57	230.8
6	10.31 – 12.36	3.20	12.65	N/A
7	2.065 – 2.346	-0.35	16.54	84.90
8	0.515 – 0.896	-4.70	243.1	1362

5.3 Corrección geométrica de las imágenes de satélite

Hay dos técnicas que se pueden utilizar para corregir los diversos tipos de distorsión geométrica presente en los datos de la imagen digital. Uno debe modelar la naturaleza y la magnitud de las fuentes de distorsión y usar estos modelos para establecer fórmulas de corrección. Esta técnica es eficaz cuando los tipos de distorsión están bien caracterizados, como la causada por la rotación de la Tierra. El segundo enfoque depende de establecer relaciones matemáticas entre las direcciones de los píxeles de la imagen y las coordenadas correspondientes de los puntos sobre el terreno (a través de un mapa). Estas relaciones pueden ser utilizadas para corregir la geometría de la imagen, independientemente del conocimiento del analista de la fuente y el tipo de distorsión. Este procedimiento será tratado primero ya que es el más comúnmente utilizado y, como una técnica, es independiente de la plataforma utilizada para la adquisición de

datos. La corrección por los modelos matemáticos se discute más adelante. Antes de proceder debe tenerse en cuenta que cada banda de la imagen tiene que ser corregida. Sin embargo, puesto que a menudo se puede suponer que las bandas son bien registradas el uno al otro, las medidas adoptadas para corregir una banda en una imagen, pueden ser usadas sobre todas las bandas restantes (Richards, 1986).

5.3.1 Corrección geométrica por puntos de control

Una de las suposiciones que se hace en este procedimiento es que se tiene un mapa disponible de la región correspondiente a la imagen, y que está corregida geométricamente. Definimos entonces dos sistemas de coordenadas cartesianos como muestra la Figura 15. Uno describe la posición de los puntos en el mapa (x,y) y el otro sistema coordenado define la posición de los píxeles en la imagen (u,v). Ahora supongamos que los dos sistemas de coordenadas están relacionados vía un par de funciones f y g , tal que:

$$u = f(x, y) \quad (5.6)$$

$$v = g(x, y) \quad (5.7)$$

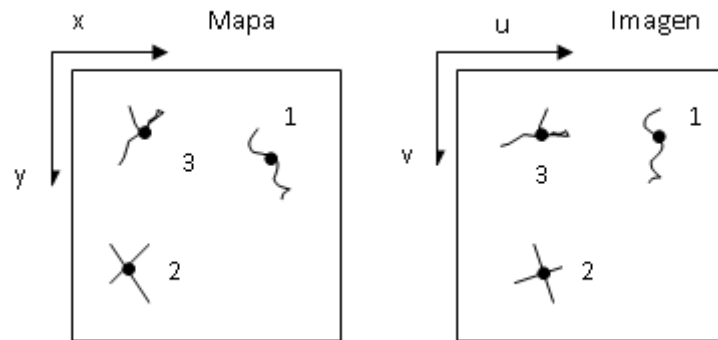


Figura 15. Sistemas de coordenadas para la imagen y el mapa (Richards, 1986).

Si estas funciones f y g son conocidas entonces podemos localizar un punto en la imagen conociendo su posición sobre el mapa. En principio, lo inverso también es cierto. Mientras este proceso es directo, hay algunas dificultades prácticas que deben ser tomadas en cuenta. Primero, nosotros no conocemos la forma explícita de las funciones de la ecuación (5.6) y (5.7) [44].

5.4 Polinomios y puntos de control

Ya que las formas explícitas de las funciones de las ecuaciones (5.6) y (5.7) no son conocidas, estas son generalmente elegidas como polinomios simples de primer, segundo y tercer orden. Por ejemplo, en el caso de segundo orden:

$$u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (5.8)$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \quad (5.9)$$

Algunas veces polinomios de órdenes superiores a tres son usados, pero debe tenerse en cuenta de evitar la introducción de errores difíciles de ser corregidos. Si los coeficientes a_i y b_i en la ecuaciones (5.8) y (5.9) son conocidos entonces los polinomios pueden ser usados para relacionar cualquier punto en el mapa a su correspondiente punto en la imagen. Como en la discusión anterior, a pesar que los coeficientes son desconocidos, sus valores pueden ser estimados identificando un conjunto de puntos en el mapa que puedan también ser identificados sobre la imagen. Estos puntos, son comúnmente llamados puntos de control del suelo (GCP's), estos puntos bien definidos y espacialmente pequeños deben ser intersecciones de carreteras, intersecciones de pistas de aterrizajes de aeropuertos, curvas y ríos, líneas de costas, etc. Se eligen suficientes de estos puntos tal que los coeficientes puedan ser estimados por substitución en los polinomios y obtener el conjunto de ecuaciones para estas incógnitas. Las ecuaciones (5.8) y (5.9) muestran que el número mínimo requerido para polinomios de segundo orden es seis. Asimismo, un mínimo de tres números son necesarios para un polinomio de primer orden y diez para el de tercer orden. En la práctica sin embargo se requieren más que estos y los coeficientes son evaluados usando estimación por mínimos cuadrados. En esta forma cualquier punto de control que contenga errores significativos en la posición ya sea en el mapa o en la imagen no tiene una influencia indebida sobre los coeficientes del polinomio (Richards, 1986).

5.5 Remuestreo

Habiendo determinado la forma explícita de los polinomios por uso de los puntos de control el siguiente paso es hallar puntos en la imagen correspondiente a cada posición en la cuadrícula de píxeles previamente definidas sobre el mapa. El espaciamiento de tal cuadrícula se elige de acuerdo al tamaño del píxel requerido en la corrección de la imagen y no necesariamente la misma que la versión original distorsionada geométricamente. Por el momento, supondremos que los puntos localizados en la

imagen corresponden exactamente a centros de píxel de la imagen. Entonces estos píxeles son simplemente transferidos a las posiciones apropiadas sobre la cuadrícula de visualización para construir sobre la imagen rectificada (Richards, 1986). Este es el caso de la Figura 16.

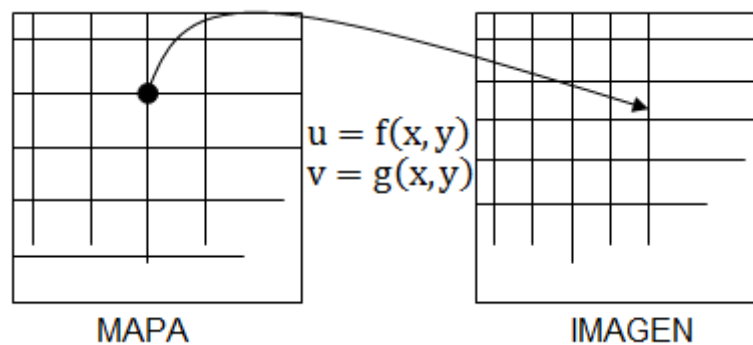


Figura 16. Uso de los polinomios para localizar puntos en la imagen correspondiente a las posiciones de la cuadrícula de visualización (Richards, 1986).

Existen varios métodos para la transferencia de las cuentas digitales a la nueva posición en la imagen corregida geoméricamente, operaciones conocidas con el nombre de Remuestreo (resampling), mediante las cuales se trasladan los valores digitales de sus posiciones en la imagen transformada a las posiciones definidas en la imagen corregida.

5.6 Interpolación

Como era de esperarse, los centros de la cuadrícula a partir de la cuadrícula de píxeles registrados en el mapa o son usualmente proyectadas a los centros de los píxeles exactos en la imagen, como muestra la Figura 15, y se tiene que tomar alguna decisión para que cada valor de brillo de cada píxel (cuenta digital) deba ser colocado sobre la nueva cuadrícula. Se pueden usar tres técnicas para este propósito (Richards, 1986).

- **Método del vecino más próximo**

Este método consiste en aplicar un algoritmo que asigna a cada píxel de la imagen corregida el valor de brillo correspondiente al píxel de la imagen transformada cuyo centro este más cercano al de la corregida. Este procedimiento no supone alternación en los valores de brillo de la imagen original, si no solamente la traslación a otra localización (Richards, 1986).

- **Interpolación bilineal**

El algoritmo de interpolación bilineal asigna al píxel corregido la media ponderada de los valores de brillo correspondientes a los cuatro píxeles más cercanos de la imagen transformada, donde el peso asociado a cada valor de brillo es proporcional a la cercanía de aquellos, medida a la distancia entre los centros de los píxeles. Este método produce resultados suavizados, pues las cuatro posiciones más próximas a cada píxel corregido contribuyen al valor de brillo de la misma, y es útil cuando se trata de corregir imágenes con información cuantitativa (Richards, 1986).

- **Convolución cúbica**

El método de Convolución cúbica es una interpolación muy utilizada que emplea polinomios de tercer orden. Este método es en esencia similar al anterior (interpolación bilineal), diferenciándose de él solamente en que para realizar la media ponderada se involucran los dieciséis píxeles más cercanos al píxel considerado, en lugar de cuatro. Los valores de brillo de los dieciséis píxeles de la imagen transformada se interpolan linealmente en grupos de cuatro líneas de cuatro píxeles cada uno para formar cuatro interpelantes. Posteriormente se realiza otra interpolación lineal entre cuatro valores obtenidos para asignar el resultante al píxel corregido (Richards, 1986).

5.7 Conversión de la radiancia a reflectancia planetaria de las imágenes de satélite

Los valores de la radiancia de las imágenes ASTER, TM y ETM+ pueden ser convertida en reflectancia planetaria usando la siguiente formula del LANDSAT Science Data Users Handbook (Williams, 2004).

$$\rho_p = \frac{\pi L d^2}{E_0 \cos \theta} \quad (5.10)$$

Donde:

ρ_p : es la reflectancia planetaria.

L: es la radiancia espectral en la apertura del sensor.

E_0 : es la irradiancia exoatmosférica solar promedio de cada banda.

θ : Es el ángulo cenit del Sol.

d: es la razón de la distancia Tierra-Sol actual y la distancia Tierra-Sol promedio.

La razón de la distancia Tierra-Sol actual y la distancia Tierra-Sol promedio se calcula usando la ecuación 5.11, d_n es el día del año.

$$d = (1 - 0.01672 \cos(RADIAN(0.9856x(d_n - 4)))) \quad (5.11)$$

El problema surge con la adquisición de las medidas E_0 que dependen de la banda, que a diferencia de la documentación para la TM y ETM+, no son incluidas dentro de la guía de usuarios ASTER. Los valores de la irradiancia exoatmosférica solar promedio de cada banda (E_0) fueron calculadas usando la siguiente ecuación (Markhan y Barker, 1986).

$$E_0 = \frac{\sum\{(R_{FN(\lambda)} \times \text{Solar Irradiance}) \times \Delta\lambda_\lambda\}}{\sum\{(R_{FN(\lambda)}) \times \Delta\lambda_\lambda\}} \quad (5.12)$$

Donde, $R_{FN(\lambda)}$ son las funciones de respuesta espectral de las bandas VIS-NIR y $\Delta\lambda_\lambda$ es el intervalo de muestreo de cada banda. Las funciones de respuesta espectral de las bandas VIS-NIR tienen intervalos de muestreo variable, con las bandas 1 y 3N que tienen $\Delta\lambda_\lambda = 0.004 \mu\text{m}$ y la banda 2 que tiene $\Delta\lambda_\lambda = 0.003 \mu\text{m}$. Esta metodología puede también ser aplicada no sólo a las bandas del sensor SWIR, sino también a otros sensores donde son conocidas las funciones de respuesta espectral (Markhan y Barker, 1986).

5.8 Corrección atmosférica usando el módulo FLAASH

Los modelos de corrección atmosférica están disponibles y listos a usar en softwares, para nombrar unos pocos: Atmospheric Correction (ATCOR), “Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes” (FLAASH) desarrollado de “Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model” (MODTRAN); “Atmosphere Removal Program” (ATRIM), ATCPRO and “High Accuracy Atmospheric Correction for Hyper spectral data” (HATCH) desarrollado del Código 5S (“Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum”) y el Código 6S (“Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum”) respectivamente. Los métodos disponibles de la corrección atmosférica brindan los fundamentos teóricos de los procesos involucrados en la corrección atmosférica. El modelo de corrección atmosférica FLAASH fue usado en el presente estudio. FLAASH es un algoritmo más sofisticado basado en el MODTRAN que puede compensar los efectos atmosféricos más exactamente. Las entradas en el módulo FLAASH incluye la elevación promedio del área de estudio, coordenadas del centro de estudio, tipo de sensor, fecha y tiempo de vuelo, y información acerca de la distribución de aerosoles, visibilidad y condiciones del vapor de agua. La corrección atmosférica (o compensación) de las imágenes

espectrales se refiere a la recuperación de la reflectancia espectral de la superficie de las radiancias medidas. Varios métodos para hacer la corrección atmosférica son descritos en la literatura. Corrección atmosférica es un prerequisite a muchas aproximaciones del análisis de los datos imágenes. Los métodos de corrección basados en el modelo y empíricos están disponibles. Tres métodos de corrección atmosférica basados en el modelo existen y son: ATREM, ACORN y FLAASH. Todos estos siguen básicamente el modelo de transferencia radiativa mostrada debajo (Gao y Goetz, 1990), aunque cada modelo usa una versión ligeramente diferente y el algoritmo FLAASH adiciona un término para tomar en cuenta los efectos adyacentes (Adler et al., 1999).

$$L_0(\lambda) = L_{sol}(\lambda)T_\lambda R_\lambda \cos(\theta) + L_{camino}(\lambda) \quad (5.13)$$

Donde:

λ : Longitud de onda

$L_0(\lambda)$: Radiancia observada en el sensor

$L_{sol}(\lambda)$: Radiancia del Sol arriba de la atmosfera

T_λ : Transmitancia atmosférica total

R_λ : Reflectancia de la superficie

θ : Ángulo de incidencia

$L_{camino}(\lambda)$: Radiancia dispersada en el camino

Los programas de corrección atmosférica actuales asumen que la superficie terrestre es horizontal y tiene una reflectancia Lambertiana. Esto es porque para datos reales típicamente no tenemos suficiente información para hacer la corrección topográfica. El resultado final es llamado "reflectancia de la superficie escalada" o "reflectancia aparente". La reflectancia de la superficie escalada puede ser convertida a reflectancia de la superficie si la topografía de la superficie es conocida. Ya que el espectro de reflectancia es independiente de la iluminación, el espectro de la reflectancia permite la identificación de los materiales en una escena al comparar el espectro de reflectancia de la escena a una librería de espectro conocido. La reflectancia en sensor aún tiene los efectos de dispersión y absorción atmosférica presente (Kruse, 2008). Los efectos atmosféricos tienen que ser eliminados al deducir las razones de diferentes bandas espectrales. Esto puede ser emprendido en dos formas (Figura 17):

- (i) Al usar la reflectancia como la base de la detección de cambio sobre el tiempo.
- (ii) Al usar la reflectancia en modelos absolutos basados en la física. Varios estudios han sido llevados a cabo con métodos que evolucionan para cuantificar y compensar los efectos deletéreos de la atmosfera en imágenes espectrales, que resultan en una variedad de métodos y modelos de corrección atmosférica.

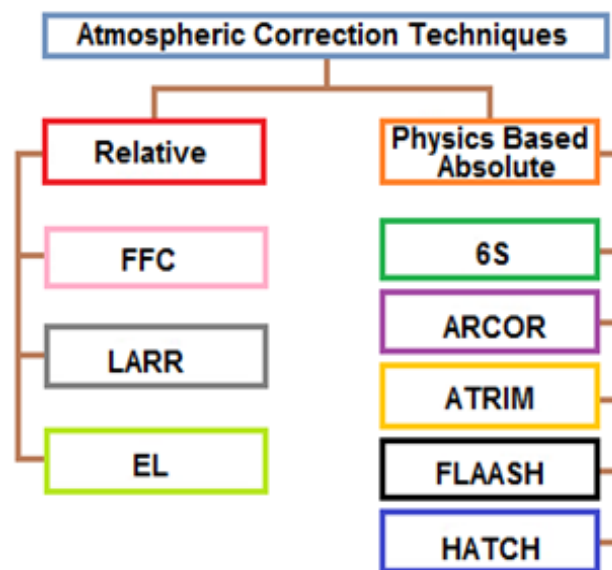


Figura 17. Técnicas de corrección atmosféricas disponibles (Prashant, 2007).

5.9 Paquetes software de corrección atmosférica FLAASH

FLAASH es un paquete software de corrección atmosférica basado en MODTRAN desarrollado por “Air Force Phillips Laboratory, Hanscom” AFB y “Spectral Sciences, Inc” (SSI). El software de corrección atmosférica FLAASH proporciona una deducción basado en la física de la reflectancia de la superficie aparente, a través de la deducción de las propiedades atmosféricas, tal como, el albedo de la superficie, altitud de la superficie, columna del vapor de agua, profundidad óptica de los aerosoles y de las nubes, temperatura atmosférica y de la superficie según datos HSI. FLAASH opera en el rango espectral de 0.4 a 2.5 micrómetros. Primero, las simulaciones MODTRAN de la radiancia espectral son ejecutados para varias condiciones atmosféricas de visión (ángulos del sol) y vapor de agua sobre un rango de reflectancia de la superficie para establecer "look up tables" para los parámetros atmosféricos del vapor de agua de la columna, tipos de aerosol y visibilidad para uso subsecuente. Típicamente, las bandas

de agua de 1.13 micrómetros son usadas para estimar el vapor de agua y la razón de las radiancias en la banda y fuera de la banda permite estimación de la profundidad de las bandas absorción para un rango de las densidades de la columna de vapor de agua. FLAASH también obtiene presión en altitudes al aplicar el mismo método para la banda de absorción de 0.762 micrómetro de oxígeno. Los espectros de radiancia son extraídos de los datos AVIRIS y comparados a las "look up tables MODTRAN" sobre la base de pixel a pixel, para determinar la reflectancia de la superficie escalada.

5.10 Módulo FLAASH

FLAASH toma como base una ecuación estándar para la radiancia espectral en un pixel en el sensor, L , aplicado para el rango de longitud de onda solar (la emisión térmica es despreciada), en materiales Lambertianas o equivalentes (Matthew et al., 2000). La ecuación es la siguiente:

$$L = \left(\frac{A\rho}{1-\rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1-\rho_e S} \right) + L_a \quad (5.14)$$

Dónde:

ρ : es la reflectancia superficial del pixel

ρ_e : es la reflectancia superficial promedio del pixel y la región de entorno.

S : es el albedo esférico de la atmósfera.

L_a : es parte de la radiancia dispersada por la atmósfera

A y B : son coeficientes que dependen de las condiciones atmosféricas y geométricas pero no depende de la superficie

Cada uno de estos términos depende de la banda espectral; el índice longitud de onda tiene que ser omitido por simplicidad. El primer término de la ecuación (5.14) corresponde a la radiancia que es reflejado de la superficie y llega directamente al sensor, mientras el segundo término corresponde a la radiancia de la superficie que es dispersado por la atmósfera hacia el sensor. La diferencia entre ρ y ρ_e corresponde a efectos de adyacencia (mezcla espacial de radiancia entre pixeles cercanos) causado por la dispersión atmosférica. Para ignorar la corrección de los efectos adyacentes, establecemos $\rho = \rho_e$. Sin embargo, esta corrección puede dar resultados con errores de reflectancia significativos en longitudes de onda corta, especialmente bajo las condiciones nebulosas y cuando ocurre un contraste entre los materiales en la escena.

Los valores de A, B, S y L_a son determinados del cálculos MODTRAN 4 que usa los ángulos de observación, solar y la elevación promedio de la superficie de las mediciones, y ello asume un cierto modelo atmosférico, tipo de aerosol y rango visible. Los valores de A, B, S y L_a dependen fuertemente de la cantidad de columna de vapor de agua, que generalmente no se conoce y puede variar de acuerdo a la escena. Para responder a variables de columnas de vapor de agua desconocido, los cálculos MODTRAN 4 son orientados sobre una serie de diferentes cantidades de columnas, luego las bandas de longitudes seleccionadas de una imagen son analizadas para recuperar una cantidad estimada por cada pixel. Especialmente, la radiancia promedio son tomados dos conjunto de bandas: un conjunto de absorción centrada en la banda de agua (típicamente de 1130nm) y una referencia de bandas tomadas simplemente fuera de la banda. Una tabla de búsqueda para recuperar el vapor de agua de estas radiancias es establecida. Para las imágenes que no contienen bandas con longitudes de ondas apropiadas para el soporte de recuperación de agua (por ejemplo, Landsat o SPOT), la cantidad de columna de vapor de agua es determinado por el modelo atmosférico seleccionado por el usuario. Después de realizada la recuperación de agua, la ecuación (5.14) es solucionada para la reflectancia superficial del pixel en todas las bandas del sensor. El método de la corrección atmosférica implica calcular una imagen de radiancia promedio espacial L_e del cual la reflectancia promedio espacial ρ_e es estimada usando la ecuación aproximada:

$$L_e \approx \left(\frac{(A+B)\rho_e}{1-\rho_e S} \right) + L_a \quad (5.15)$$

El promedio espacial es realizado usando una función propagada de punto que describe las contribuciones relativas para la radiancia del pixel de puntos sobre el terreno para diferentes distancias de la línea de visión directa. Para resultados precisos, los pixeles que contienen nubes deben ser removidos antes de promediar. Los pixeles nublados son encontrados usando una combinación de brillos, razón de banda y pruebas de vapor de agua (Matthew et al., 2000).

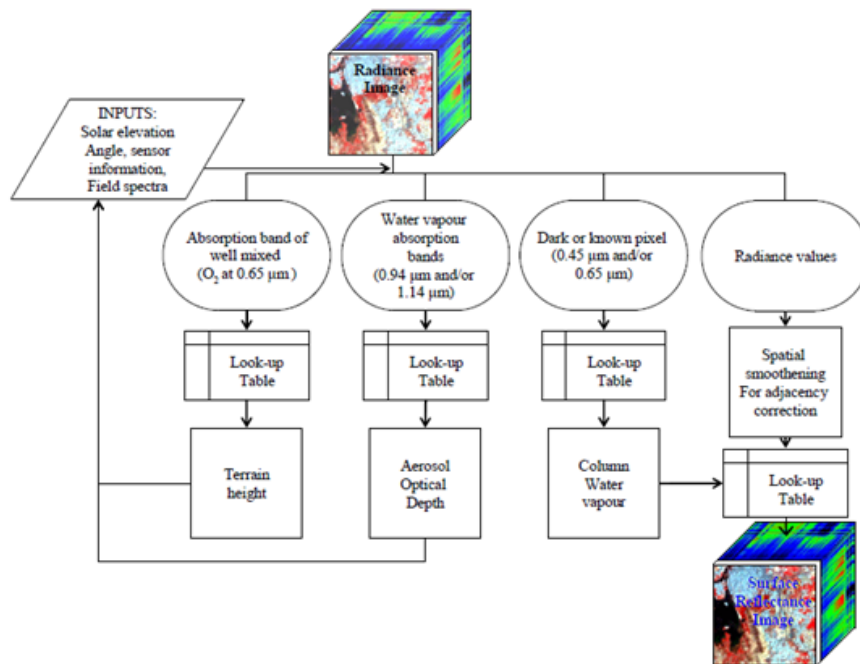


Figura 18. Proceso esquemático del modelo FLAASH que muestra los pasos que intervienen en la conversión de radiancia a reflectancia (Griffin y Hsiao-Hua, 2003).

5.11 Extracción de los valores de reflectancia espectral del suelo

Para obtener los valores de Reflectancia ρ_λ de cada punto de muestreo para cada una de las áreas de estudio se desarrolló los siguientes pasos:

1. Los puntos de muestreo se ubicaron en cada una de las imágenes con ayuda del ENVI, lo cual ayudó a reconocer las áreas de estudio y de esta forma poder delimitarlas construyendo una región de interés.
2. Se construyó un vector que sirvió para delimitar a cada una de las áreas.
3. Después del proceso anterior, se procedió a obtener una imagen recortada (sub-escena), la cual muestra solamente las áreas de estudio las mismas que se encuentran delimitadas por el vector.
4. Una vez obtenida la sub-escena, se prosiguió a extraer los valores de Reflectancia (ρ_λ) para cada una de los puntos de muestreo, así como también se obtuvieron sus coordenadas imagen (WGS - 84) y los valores de las filas y columnas de los píxeles que representan la ubicación de estos puntos.

5.12 Estimación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Se ha desarrollado diversas técnicas para estudiar cualitativa y cuantitativamente el estado de la vegetación a partir de medidas espectrales obtenidas por satélites. Con el fin de reducir el número de dimensiones propias de las medidas multiespectrales a una sola dimensión, se ha definido los Índices de vegetación. Los índices de vegetación son combinaciones de bandas espectrales, cuya función es realzar la contribución de la vegetación en función de la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores como suelo, iluminación, atmósfera, etc. Todos los organismos fotosintéticos contienen uno o más pigmentos capaces de absorber la radiación visible que iniciaría las reacciones fotoquímicas y fotosintéticas. Dos bandas del espectro, la azul (430 nm) y la roja (580-680 nm) muestran la cantidad de energía absorbida por las plantas; en contraste, la banda del infrarrojo cercano (725-1100 nm) (región invisible para el ojo humano) actúa justo de forma inversa. La mayor absorción del rojo y azul, junto con la fuerte reflexión del infrarrojo cercano es la diferencia espectral de la respuesta de toda la vegetación, y ha sido usado durante mucho tiempo como forma de diferenciación de las superficies con y sin vegetación. La vegetación verde y vigorosa refleja mucho menos en la banda visible roja, región de absorción de la clorofila, que en la banda cercana infrarroja, región de alta reflectancia del componente celulósico. Cuando la vegetación sufre stress, los valores de la banda del visible rojo aumentan y los de la banda del cercano infrarrojo decrecen. Estas propiedades llevaron a definir varios índices de vegetación basados en operaciones algebraicas entre las bandas. Uno de los algoritmos más conocidos es el del llamado Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) que se define como (Chen et al., 2005):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (5.16)$$

ρ_{NIR} : Reflectancia en el infrarrojo cercano

ρ_R : Reflectancia en el rojo

El NDVI para la imagen ASTER se calcula tomando la banda 2 y 3N (Chen et al., 2005).

$$NDVI = \frac{\rho_{3N} - \rho_2}{\rho_{3N} + \rho_2} \quad (5.17)$$

El NDVI para las imágenes TM y ETM+ se calcula tomando la banda 3 y 4 (Chen et al., 2005):

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (5.18)$$

5.13 Rango de valores del NDVI

El intervalo de valores obtenido del NDVI, varía entre (-1) y el (+1). Sólo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación. Los valores negativos, generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas. El valor del NDVI puede variar en función del uso de suelo, estación fenológica, situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona. Estas propiedades hacen que el NDVI se haya constituido en una valiosísima herramienta para la evaluación de cubiertas vegetales (Figura 19), así como para estudiar la clasificación y dinámica vegetal y sus aspectos fenológicos (Chen et al., 2005). Ejemplo:

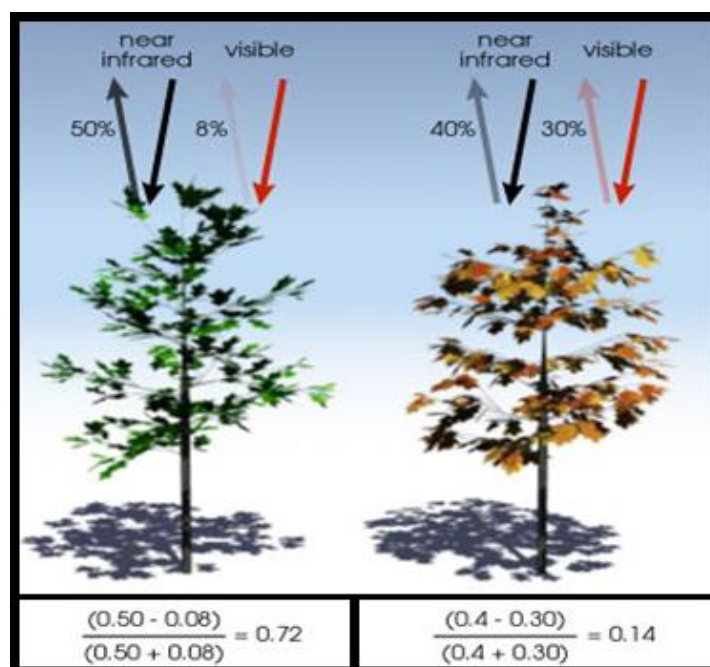


Figura 19. Valores del NDVI para diferentes periodos (<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation>)

Para el caso del área de estudio de La Viña se aplicó la relación de NDVI de la ecuación 5.17 y 5.18, para el área de Saltur, Ucupe y San Antero se utilizó la ecuación 5.18, utilizando una de las herramientas básicas de ENVI para convertir los valores de reflectancia a valores de NDVI (parámetro biofísico muy utilizado y de vital importancia para el estudio de la salinidad), obteniendo de esta forma para cada píxel un valor de NDVI, siendo diferente los valores para cada área de estudio.

Luego de ejecutarse la nueva imagen fue visualizada con ENVI donde observamos los diferentes valores de NDVI que conforman toda la sub escena; y con el propósito de una mejor visualización de estos índices, se aplicó una paleta de colores, a los cuales se les asignó sus respectivos rangos o niveles de NDVI creándose de esta forma mapas digitales, lo cual ayudó posteriormente a editar los Mapas Clasificados de salinidad del Suelo.

5.14 Estimación del Índice de Salinidad (IndSal)

El índice de salinidad, que es producido por las reflectancia de las bandas 4 y 5 de la imagen ASTER es:

$$\text{IndSal} = \frac{\rho_4 - \rho_5}{\rho_4 + \rho_5} \quad (5.19)$$

Tiene una precisión de la detección general de la salinidad en los suelos desnudos, Esto se puede aplicar cuando la tierra está en barbecho (Al-Khaier, 2003).

5.15 Análisis de componentes principales de las imágenes

El objetivo del Análisis de Componentes Principales (ACP) es resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto (más pequeño) sin perder una parte significativa de la información original. Para el usuario final de productos de teledetección, el objetivo del PCA es construir una o varias imágenes que incrementen su capacidad de diferenciar distintas coberturas. Es por ello que al realizar una composición color resulta interesante usar, en lugar de algunas bandas de la imagen, los componentes principales (PC1, PC2, PC3) en la secuencia RGB respectivamente (Chuvienco, 1996).

El PCA, Puede aplicarse como realce previo a la interpretación visual o como procesamiento anterior a la clasificación. En general, esta técnica incrementa la eficiencia computacional de la clasificación porque reduce la dimensionalidad de los

datos. Por otra parte, desde el punto de vista estadístico, el PCA facilita una primera interpretación sobre los ejes de variabilidad de la imagen, lo que permite identificar aquellos rasgos que aparecen en la mayoría de las bandas y aquellos otros que son específicos de algún grupo de ellas.

Esta tesis se refiere a casos en los que interesa identificar la información común a la mayoría de las bandas, que está presente en los primeros componentes. El PCA también es usado en aplicaciones multitemporales con el objeto de detectar cambios en distintas fechas. En este caso los primeros componentes resultantes del análisis no son los más interesantes, ya que recogen información común a las distintas fechas (la estable). Los últimos componentes ofrecen la información no común (el cambio).

Algebraicamente, el PCA genera nuevas variables (componentes) mediante una combinación lineal de las 'p' variables originales (bandas). Aunque se requieren los 'p' componentes principales para reproducir la variabilidad total, muchas veces la mayor parte de ella está contenida en un número menor de componentes 'm'. En ese caso, reemplazando las 'p' bandas por los 'm' componentes, se reduce la dimensionalidad del problema conservando casi la totalidad de la información, el análisis de componentes principales fue utilizado para las imágenes ASTER, para el cálculo se usó el ENVI 4.5.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de los datos de los sensores ASTER, TM y ETM+ en lo que concierne a la generación de imágenes de NDVI, IndSal, conductividad eléctrica estimada del suelo y a la generación de modelos estadísticos de regresión usando los datos in-situ de conductividad eléctrica. Estas imágenes se crearon en formato digital usando el software ENVI 4.5 y el lenguaje de programación IDL

6.1 Comportamiento espectral de la superficie del suelo, agua, vegetación y suelo afectado por la salinidad

En la Figura 20, se muestra la variación de la reflectancia de la superficie en función de la longitud de onda central de las 9 bandas VNIR y SWIR del sensor ASTER.

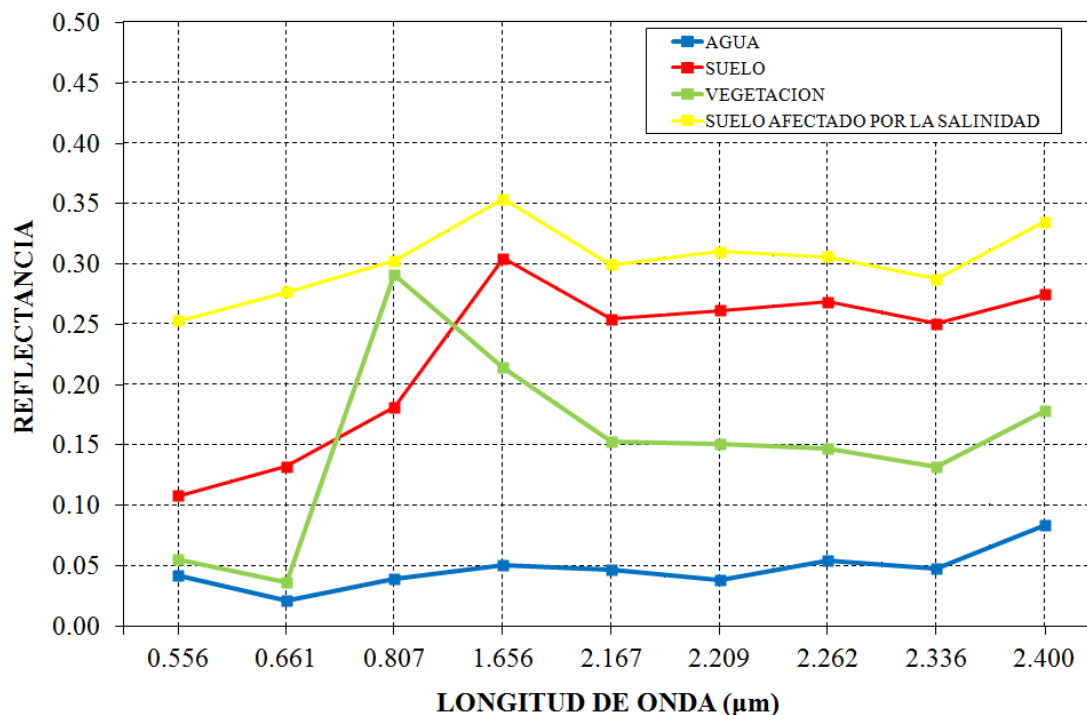


Figura 20. Reflectancia de la superficie en función de la LDO central. Las superficies usadas son el suelo, suelo afectado por la salinidad, agua y vegetación. La LDO central de las 9 bandas VNIR y SWIR de las imágenes ASTER (20-11-07) han sido usadas.

Debido al mecanismo de la interacción entre la radiación electromagnética y los diferentes cuerpos como el agua, suelo desnudo, suelo afectado por la salinidad y las superficies vegetadas, las superficies reflejan en el visible y emiten en el infrarrojo. Se observa también que la reflectancia de la superficie del agua refleja cerca del 5% o menos en el visible e infrarrojo de onda corta. El suelo muestra una reflectancia mayor que la superficie vegetada y menor que el suelo salino. La reflectancia de la superficie de vegetación tiene un valor máximo en el NIR y muy bajo en el visible y constante en el swir.

En la Figura 21, se muestra la variación de la reflectancia de la superficie en función de la longitud de onda central de las 6 bandas del sensor TM.

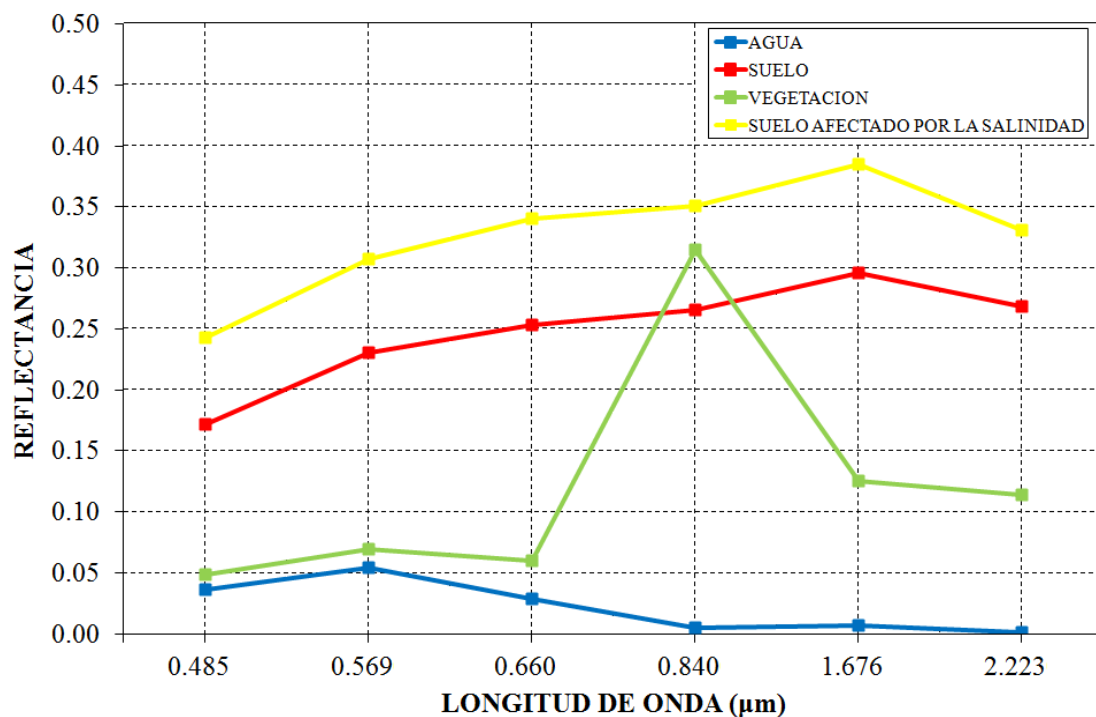


Figura 21. Reflectancia de la superficie en función de la LDO central. Se ha usado las superficies del suelo, suelo afectado por la salinidad, agua y vegetación de la imagen TM (06-05-08) en las diferentes LDO centrales de las 6 bandas (1, 2, 3, 4, 5 y 7).

Se observa que el agua refleja cerca del 5% o menos en el VNIR y SWIR. El suelo y el suelo afectado por la salinidad tienen valores altos en comparación a las otras dos superficies. La superficie con vegetación tiene su máximo en el NIR y bajo en el visible y SWIR. Estas características están de acuerdo con la literatura internacional.

6.2 Distribución Espacial del Índice de Salinidad en La Viña

La Figura 22 muestra la variación espacial del Índice de Salinidad (IndSal) en el área de estudio La Viña obtenida a partir de las reflectancias de las bandas 4 y 5 del sensor ASTER. Los datos CE in-situ fueron obtenidos en un trabajo de campo del 14 de diciembre del 2007. La imagen ASTER fue obtenida en 20 de noviembre del 2007 y tuvo una diferencia de tiempo de 25 días con la fecha del trabajo de campo.

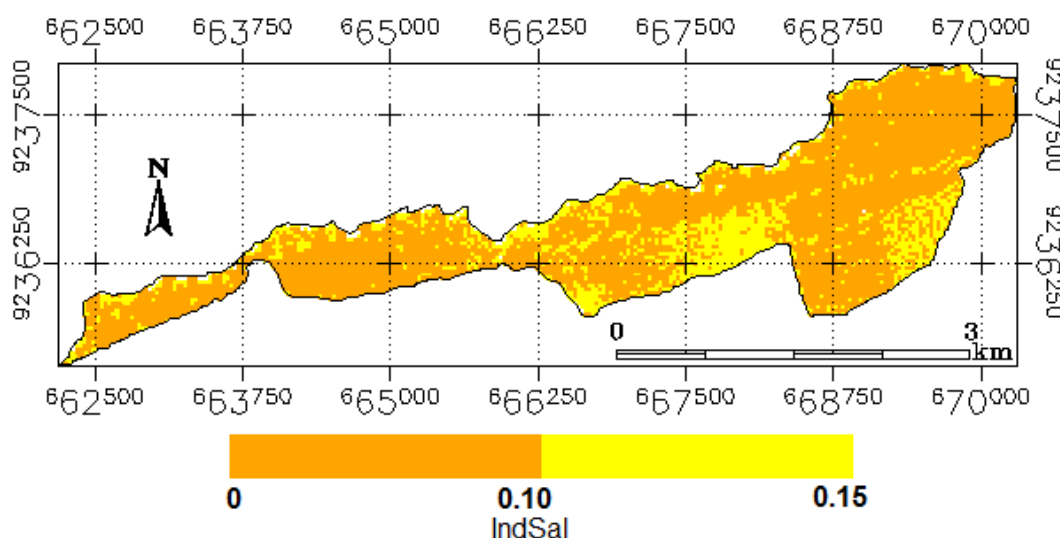


Figura 22. Distribución espacial del índice de salinidad en La Viña usando la reflectancia de la superficie espectral de las bandas 4 y 5 de la imagen ASTER (20-11-07).

Este mapa temático de Índice de Salinidad (IndSal) para La Vina muestra valores pequeños entre 0 y 0.15, esta imagen indica un suelo de baja salinidad debido a que la conductividad eléctrica estimada del suelo usando la ecuación lineal número 2 de la Tabla 11 nos da los siguientes resultados.

Cuando IndSal es mayor que 0 y menor que 0.10 → La CE estimada es menor de 1 dS/m

Cuando IndSal es mayor que 0.10 y menor que 0.15 → La CE estimada es mayor de 1 dS/m y menor de 2.25 dS/m

En la Figura 23, se muestra el grafico de dispersión del índice de salinidad obtenidos del sensor ASTER y la conductividad eléctrica in-situ de La Viña en donde la correlación es de 0.71.

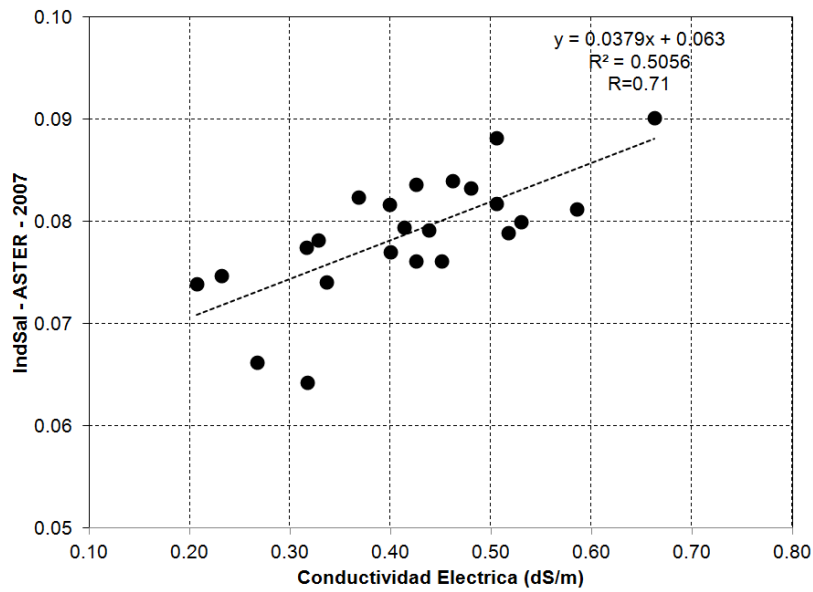


Figura 23. Gráfico de dispersión del índice de salinidad obtenidos del sensor ASTER y los datos in situ de conductividad eléctrica de La Viña. Esto presenta una correlación de 0.71.

La reflectancia de la superficie de las bandas 4 y 5 del sensor ASTER (ver anexo 4) tienen alta correlación, 0.80 y 0.61, respectivamente con la conductividad eléctrica en La Viña, ver las Figuras 24 y 25.

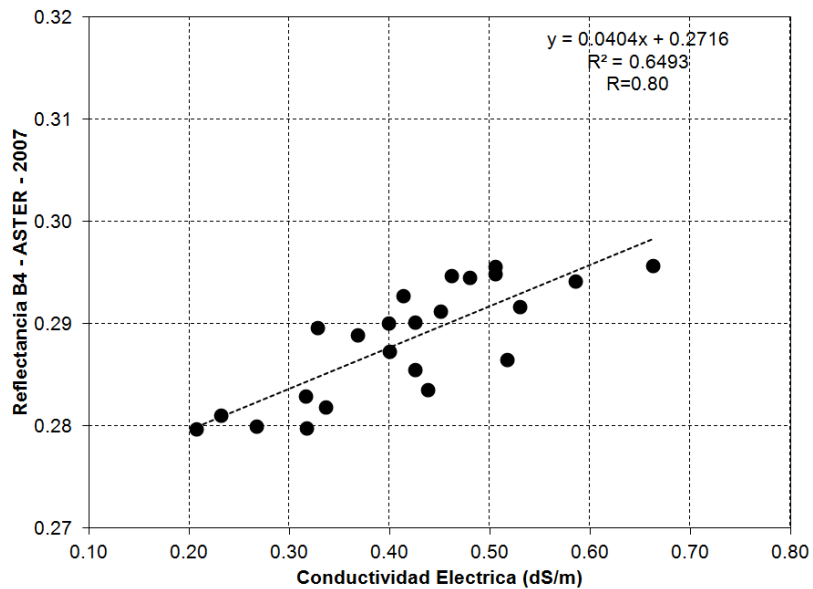


Figura 24. Gráfico de dispersión de la reflectancia de la superficie de la banda 4 del sensor ASTER (20-11-07) y la conductividad eléctrica en La Viña (14-12-07).

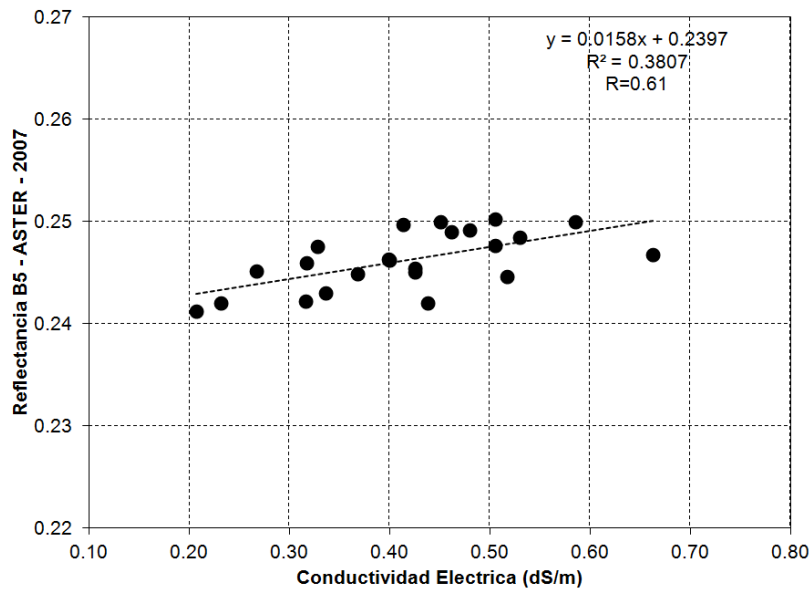


Figura 25. Gráfico de dispersión de la reflectancia de la superficie de la banda 5 del sensor ASTER (20-11-07) y la conductividad eléctrica en La Viña (14-12-07).

Según los datos de la conductividad de eléctrica in-situ del suelo en la Viña, la cual son menores a 0.8 dS/m, indica una superficie de baja salinidad (Figuras 20, 24 y 25).

6.3 Distribución Espacial y temporal del NDVI en La Viña

En la Figura 26, se muestra la distribución espacial del NDVI a partir de las bandas 2 y 3 del sensor ASTER (20-11-07). Los valores del NDVI fluctúan desde 0 a 0.8, los valores mayores a 0.3 corresponde a zonas con plantas vigorosas desarrolladas en suelos no salinos, y los valores menores que 0.3 a zonas con ausencia de plantas o con escasa población de plantas. La cobertura de la vegetación para esta imagen es de aproximadamente 151.627 ha, considerando la cobertura vegetal a partir del valor 0.3 del NDVI. Es importante señalar que el NDVI puede adquirir valores de -1 a 1 , correspondiendo los valores de 0 a zonas sin vegetación y 1 cuando la cobertura de la vegetación es máxima. Algunas coberturas, como agua, pueden dar valores negativos en el cálculo del NDVI, debido a que su reflectancia en la banda roja es mayor que en el infrarrojo cercano.

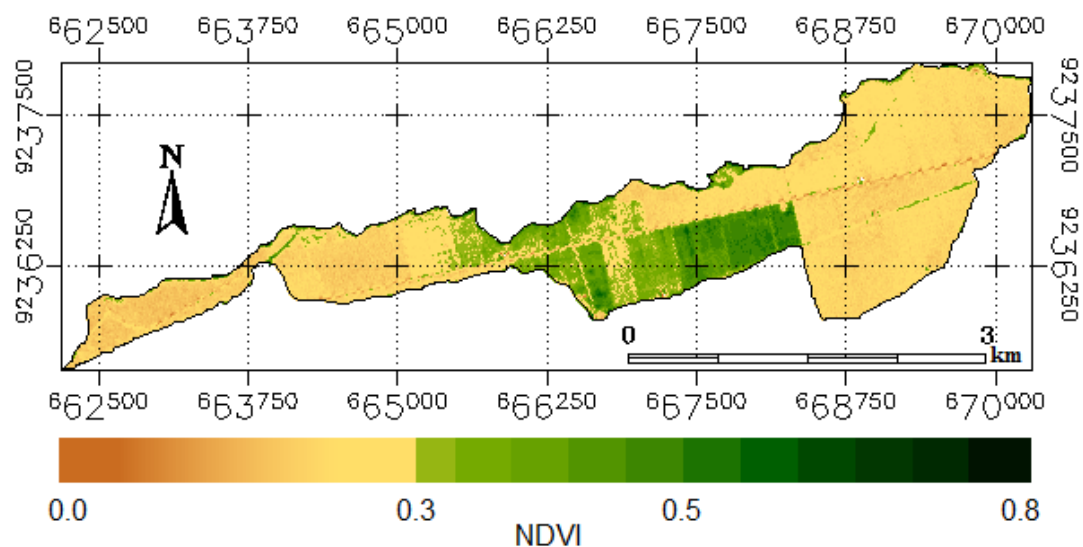


Figura 26. Distribución espacial del NDVI del área de estudio La Viña del sensor ASTER (20-11-07).

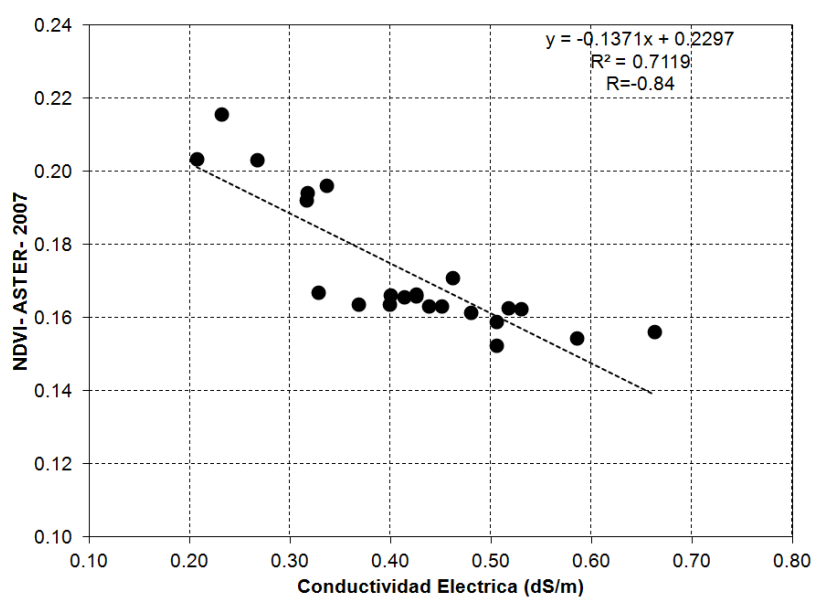


Figura 27. Gráfico de dispersión del NDVI del sensor ASTER (20-11-07) y la conductividad eléctrica en La Viña (14-12-07).

El NDVI tiene alta correlación negativa, - 0.84, con la CE en la Viña a pesar de la diferencia de días que los separa, Figura 27. Esto es un indicador que en esas zonas la salinidad del suelo es baja.

En la Figura 28, se muestra la distribución espacial del NDVI (bandas 3 y 4 del sensor ETM+ (22-12-07)). Los valores del NDVI fluctúan desde 0 a 0.8, los valores menores a 0.3 corresponde a las zonas en barbechos y mayores que 0.3 en plantas en crecimiento.

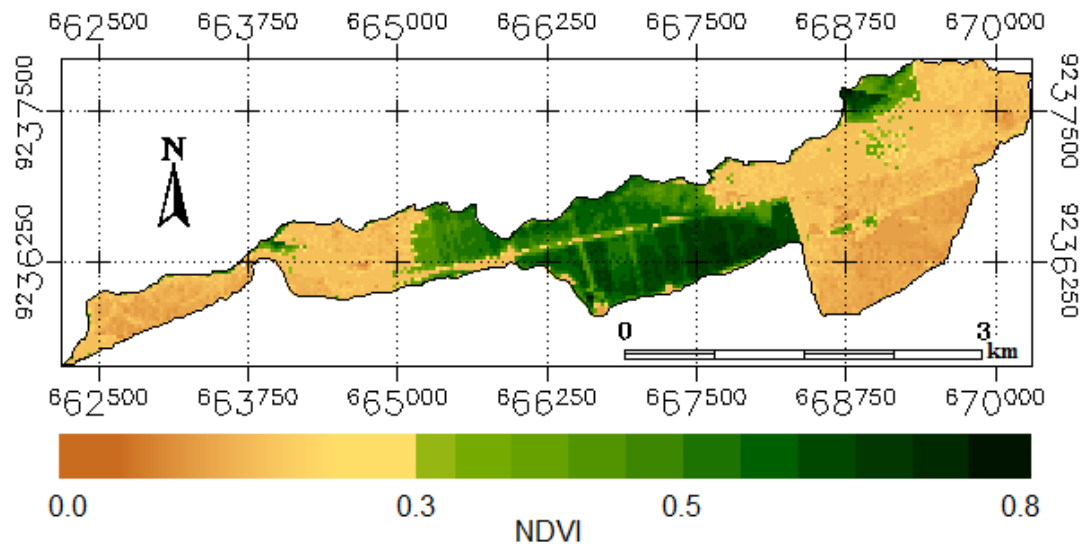


Figura 28. Distribución espacial del NDVI del área de estudio La Viña del sensor ETM+ (22-12-07).

La cobertura de la vegetación para esta imagen es de aproximadamente 227.1825 ha. La variación del área de la cobertura de la vegetación con respecto a la imagen ASTER (una diferencia de 32 días aproximadamente), es de 75.5575 ha.

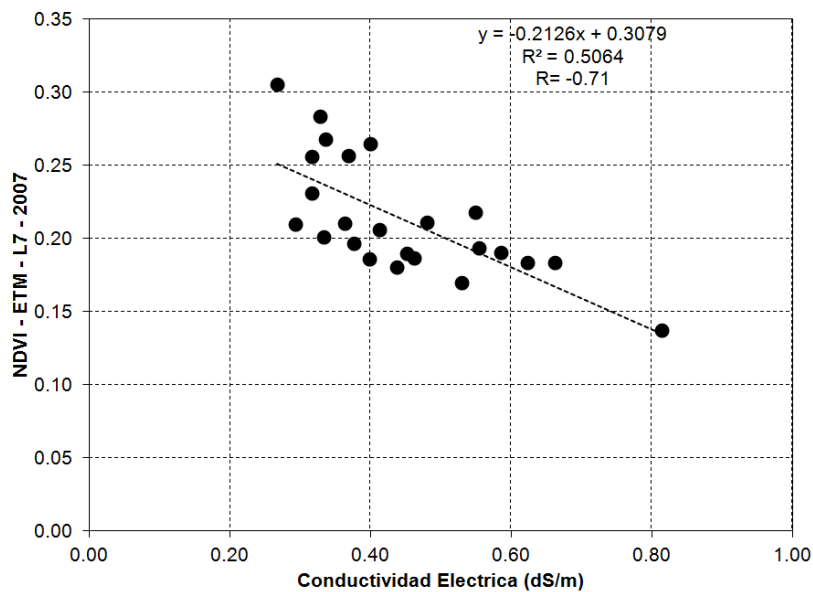


Figura 29. Gráfico de dispersión del NDVI de las bandas 3 y 4 del sensor ETM+ (22-12-07) y la conductividad eléctrica del suelo en La Viña (26-01-08).

En la Figura 29, se muestra la alta correlación negativa, - 0.71, del NDVI del sensor ETM+ (22-12-07) y la CE del suelo (26-01-08). Esta relación muestra que mientras que el NDVI disminuye la CE aumenta.

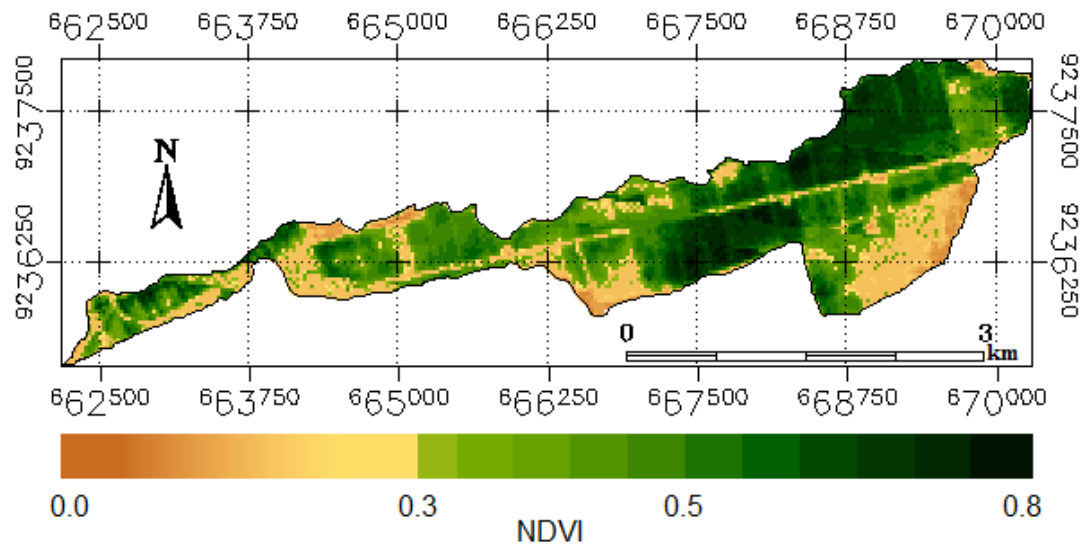


Figura 30. Distribución espacial del NDVI del área de La Viña usando las bandas 3 y 4 del sensor ETM+ (08-02-08).

En la Figura 30, se muestra la distribución espacial del NDVI obtenida de las bandas 3 y 4 del sensor ETM+ (08-02-08). Los valores del NDVI fluctúan desde 0 a 0.8. La variación del área de la cobertura de la vegetación con respecto a la imagen ETM + del 22 de diciembre del 2007 (una diferencia de 41 días aproximadamente), es de 240.2325 Ha.

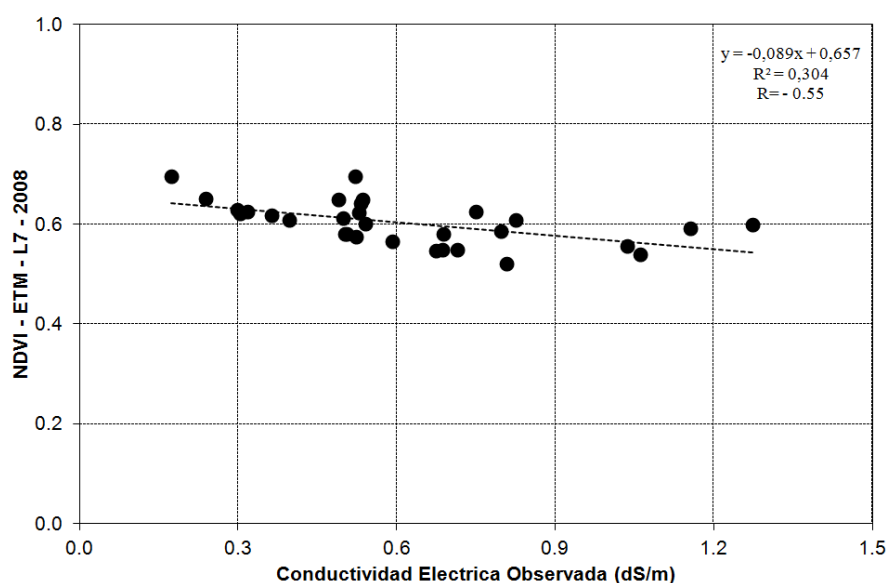


Figura 31. Gráfico de dispersión del NDVI de las bandas 3 y 4 del sensor ETM+ (08-02-08) y la conductividad eléctrica del suelo en La Viña (26-01-08).

En la Figura 31 se muestra la correlación del índice de vegetación de diferencia normalizada con los datos de campo del 26 de enero del 2008 en donde se muestra que hay una correlación negativa de - 0.55, los puntos en donde se extrajeron los datos in situ tienen un NDVI que se encuentran entre 0.5 y 0.7, pero para esos mismo puntos para la fecha de 6 de mayo del 2008 tiene un NDVI de 0.7 a 0.8 (Tabla 10). Estos valores del NDVI es un indicador que en esas zonas la conductividad eléctrica del suelo es baja.

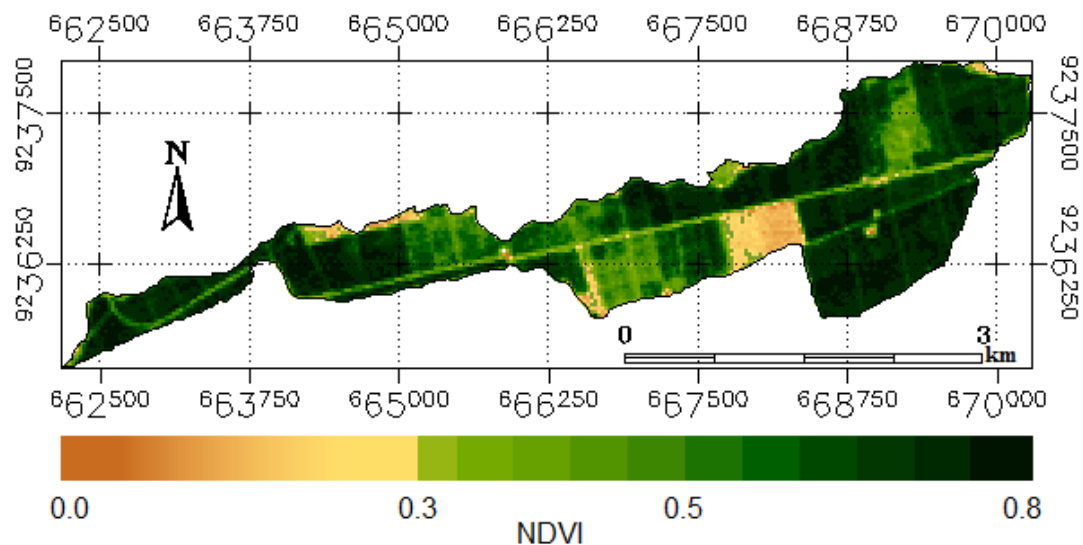


Figura 32. Distribución espacial del NDVI usando las bandas 3 y 4 del sensor TM de (06-05-08) en la Viña.

En la Figura 32, se muestra la distribución espacial del NDVI que fue generada usando las bandas 3 y 4 del sensor TM del 6 de mayo del 2008, correspondiente a la estación de otoño. Los valores del NDVI fluctúan desde 0 a 0.8. La cobertura de la vegetación para esta imagen es de aproximadamente 588.3075 ha. En esta imagen la cobertura de la vegetación abarca la mayor parte del área de estudio La Viña, entonces en mayo del 2008 la conductividad eléctrica del suelo del área de La Viña es muy baja.

En la Tabla 11, se muestra los valores del NDVI de 42 puntos de un total de 77 puntos que fueron extraídos de las 4 imágenes correspondientes al área La Viña, se observa que los valores del NDVI han aumentado desde el 20 de noviembre del 2007 hasta el 6 de mayo del 2008 eso se debe a que la salinidad en esas zona es baja.

Tabla 11. Valores del NDVI para 4 fechas.

IMAGEN WGS 84 UTM, ZONA 17 S	IMAGEN WGS 84 UTM, ZONA 17 S	NDVI ASTER	NDVI ETM+	NDVI ETM+	NDVI TM
ESTE(m)	SUR(m)	20/11/2007	22/12/2007	08/02/2008	06/05/2008
669779	9237490	0.165	0.180	0.548	0.834
669644	9237475	0.146	0.167	0.547	0.832
669704	9237535	0.183	0.180	0.575	0.829
669779	9237550	0.149	0.257	0.519	0.828
669764	9237565	0.149	0.257	0.519	0.828
669044	9236785	0.157	0.178	0.554	0.825
668984	9236845	0.142	0.150	0.567	0.824
669959	9237520	0.172	0.211	0.530	0.823
669944	9237535	0.157	0.211	0.530	0.823
663314	9236095	0.142	0.174	0.526	0.822
663224	9236035	0.130	0.174	0.680	0.816
669839	9237505	0.148	0.239	0.573	0.815
668984	9236785	0.166	0.165	0.581	0.815
663164	9235945	0.128	0.151	0.582	0.815
669944	9237580	0.158	0.159	0.551	0.813
663194	9236095	0.155	0.174	0.624	0.811
669944	9237655	0.170	0.169	0.680	0.808
669824	9237565	0.163	0.198	0.587	0.804
663284	9236065	0.142	0.163	0.735	0.804
669044	9236845	0.160	0.177	0.551	0.803
669644	9237580	0.166	0.206	0.500	0.801
662864	9235915	0.109	0.142	0.693	0.801
663074	9235945	0.151	0.174	0.461	0.800
662954	9235795	0.147	0.128	0.574	0.799
662924	9235855	0.159	0.141	0.587	0.799
663104	9235975	0.144	0.174	0.576	0.798
669899	9237565	0.157	0.185	0.544	0.794
669884	9237565	0.144	0.185	0.544	0.794
663104	9235915	0.131	0.151	0.564	0.793
670049	9237670	0.186	0.155	0.680	0.789
669284	9236905	0.143	0.168	0.622	0.785
662834	9235885	0.135	0.142	0.526	0.785
669764	9237610	0.175	0.259	0.507	0.783
663224	9235975	0.132	0.151	0.681	0.781
669644	9237595	0.156	0.206	0.500	0.781
670214	9237715	0.148	0.159	0.731	0.780
663014	9235915	0.116	0.151	0.535	0.779
669524	9237505	0.166	0.231	0.717	0.776
669164	9236815	0.168	0.169	0.714	0.775
663254	9236005	0.129	0.151	0.566	0.775
663074	9236035	0.131	0.143	0.625	0.774
669284	9236845	0.151	0.183	0.622	0.765

Las gráficas de dispersión entre el NDVI y la CE de las figuras 27, 29 y 31 presentan coeficientes de correlación negativa debido a que el área de estudio de la Viña presentan las siguientes propiedades físicas: la clase de suelo es textural medio de tipo franco, esto quiere decir que el suelo retendrá por más tiempo el agua en comparación con un suelo de tipo arenoso. La napa freática de La Viña es mayor de 2 metros, este valor de la napa freática es muy importante ya que cuando la napa freática es mayor de 2 metros la mayor parte de concentración de sales se encontraran a esa misma profundidad y no perjudicara la cobertura de la vegetación del algodón debido que las raíces de este cultivo se encuentra aproximadamente entre 30 cm a 60 cm de profundidad.

Esto explica porque la conductividad eléctrica de los suelos se relaciona más estrechamente con la cantidad de tejido fotosintéticamente activo en las coberturas vegetales. De esta manera podemos justificar que el estado de salud de las plantas depende de un porcentaje muy elevado a causa de los efectos de la salinidad de sus suelos, dependiendo también en menor proporción del cuidado agronómico y la propagación de plagas que estas sufran.

6.4 Distribución Espacial del NDVI en San Antero, Saltur y Ucupe

En la Figura 33, se muestra la distribución espacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para el área de San Antero que fue generada usando las bandas 3 y 4 del sensor TM del 6 de mayo del 2008, correspondiente a la estación de la otoño. Los valores del NDVI fluctúan desde 0 a 0.8 correspondiendo los valores más altos a zonas con plantas vigorosas desarrolladas en suelos no salinos, y los valores más bajos posiblemente a zonas salinas con ausencia de plantas o con escasa población de plantas. El área de la cobertura de la vegetación es aproximadamente de 526.6125 ha lo cual abarca casi todo el área de estudio, entonces esta cobertura de vegetación que abarca casi todo el área de estudio es un indicador que en esa zona la conductividad eléctrica es baja.

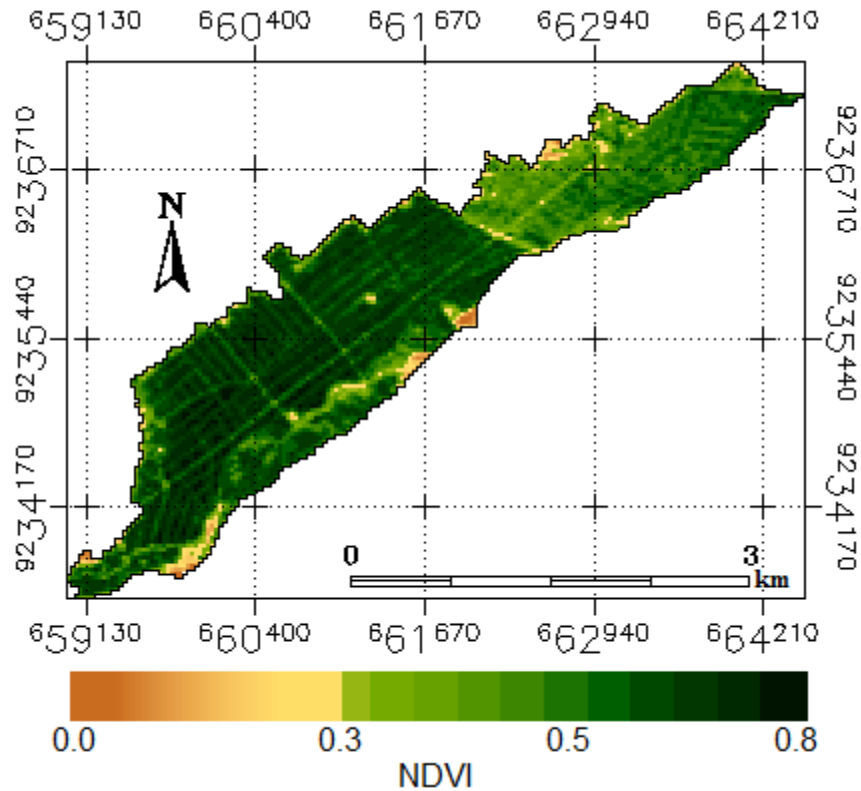


Figura 33. Distribución espacial del NDVI del área de San Antero usando las bandas 3 y 4 del sensor TM de la fecha del 6 de mayo del 2008.

En la Figura 34, se muestra la correlación del índice de vegetación de diferencia normalizada con los datos de campo del 23 agosto del 2008 en donde se muestra que hay un coeficiente de correlación negativa de - 0.73, la clase de suelo de esta área de estudio es textural medio de tipo franco en donde la napa freática es mayor de 2 metros. Los puntos en donde se extrajeron los datos in situ tienen un NDVI que se encuentran entre 0.5 y 0.8, la conductividad eléctrica mínima y máxima es de 0.040 dS/m y 0.970 dS/m respectivamente. Estos valores de la conductividad eléctrica mínima y máxima para el área de San antero es un indicador que en esas zonas la conductividad eléctrica del suelo es baja.

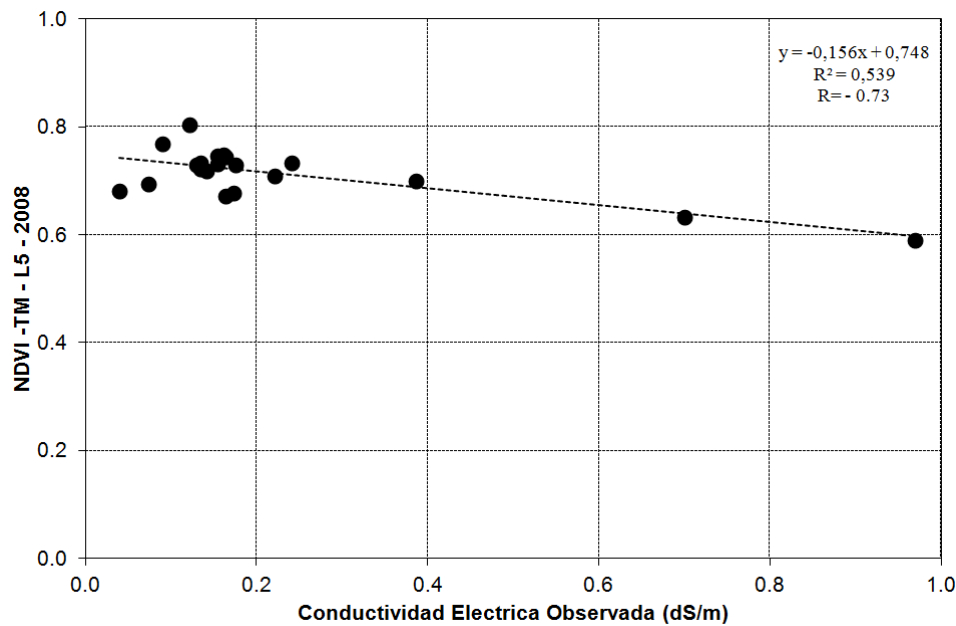


Figura 34. Gráfico de dispersión del NDVI usando las bandas 3 y 4 del sensor TM (06-05-08) y la conductividad eléctrica del suelo en San Antero (23-08-08).

En la Figura 35, se muestra la distribución espacial del índice de vegetación de diferencia normalizada para el área de Saltur que fue generada usando las bandas 3 y 4 del sensor TM del 6 de mayo del 2008, correspondiente a la estación de la otoño. Los valores del NDVI fluctúan desde 0 a 0.8. El área de la cobertura de la vegetación es aproximadamente 177.975 ha, considerando la cobertura vegetal a partir del valor 0.3 del NDVI.

En la Figura 36, se muestra la correlación del índice de vegetación de diferencia normalizada con los datos de campo del 23 agosto del 2008 en donde se muestra que hay un coeficiente de correlación negativa de - 0.34, los puntos en donde se extrajeron los datos in situ tienen un NDVI que se encuentran entre 0 y 0.4, la conductividad eléctrica mínima y máxima es de 0.089 dS/m y 0.592 dS/m. Estos valores de la conductividad eléctrica mínima y máxima para el área de Saltur es un indicador que en esas zonas la conductividad eléctrica del suelo es baja.

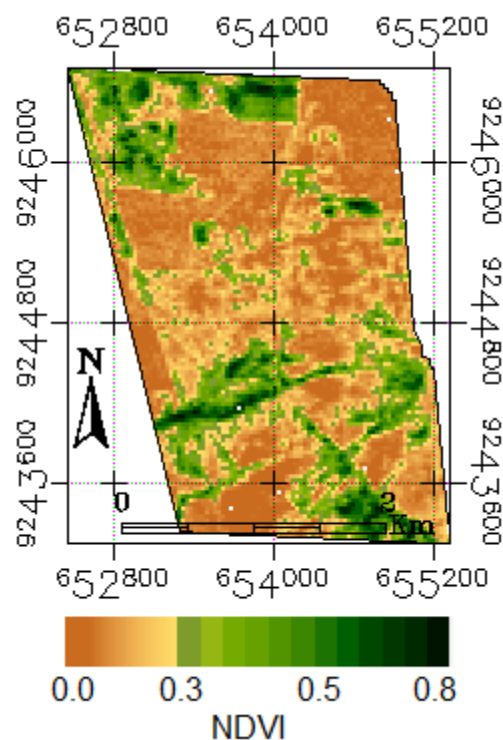


Figura 35. Distribución espacial del NDVI usando las bandas 3 y 4 del sensor TM (06-05-08) en Saltur.

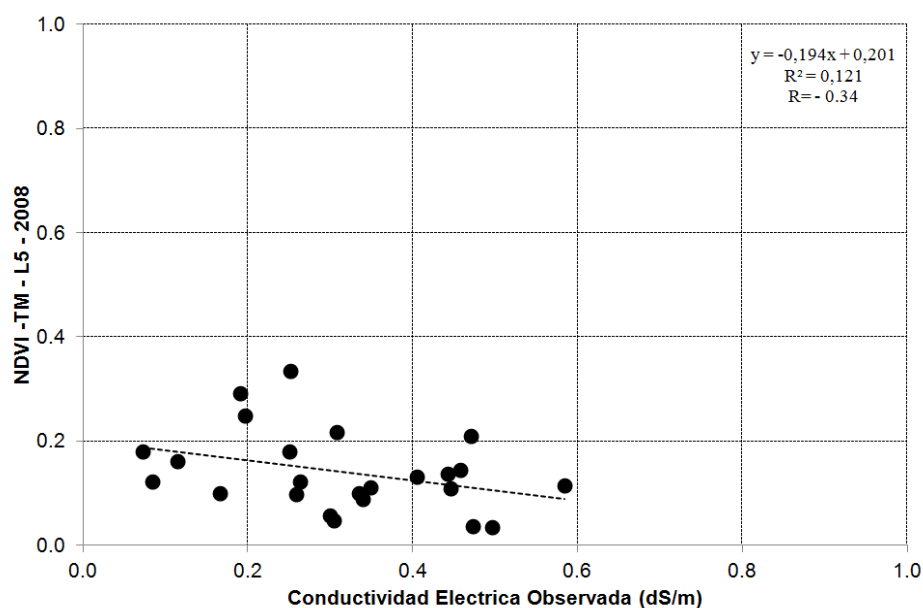


Figura 36. Gráfico de dispersión del NDVI usando las bandas 3 y 4 del sensor TM (06-05-08) y la conductividad eléctrica en Saltur (23-08-08).

En la Figura 37, se muestra la distribución espacial del índice de vegetación de diferencia normalizada para el área de Ucupe que fue generada usando las bandas 3 y 4 del sensor TM de LANDSAT 5 del 6 de mayo del 2008, correspondiente a la estación

de la otoño. Los valores del NDVI fluctúan desde 0 a 0.8. El área de la cobertura de la vegetación es aproximadamente 280.3725 ha, considerando la cobertura vegetal a partir del valor 0.3 del NDVI.

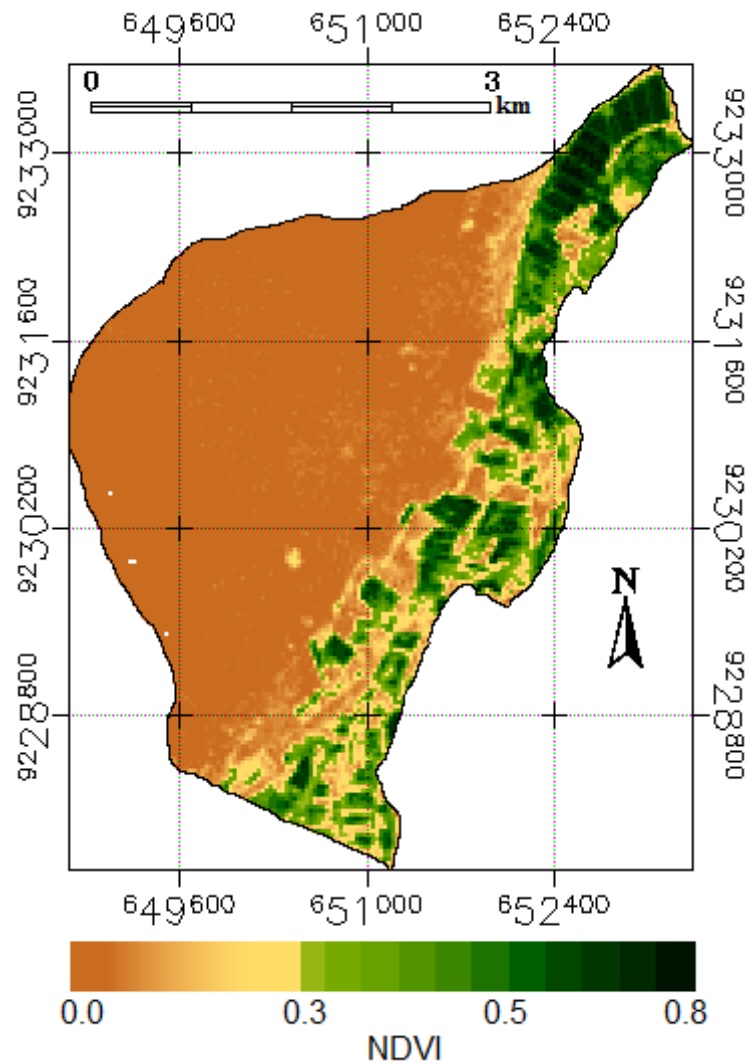


Figura 37. Distribución espacial del NDVI usando las bandas 3 y 4 del sensor TM (06-05-08) en Ucupe.

En la Figura 38 se muestra la correlación del índice de vegetación de diferencia normalizada con los datos de campo del 23 agosto del 2008 en donde se muestra que hay un coeficiente de correlación negativa de - 0.32, los puntos en donde se extrajeron los datos in situ tienen un NDVI que se encuentran entre 0 y 0.1, la conductividad eléctrica mínima y máxima es de 0.0864 dS/m y 3.44 dS/m. Estos valores del NDVI es un indicador que en esas zonas la conductividad eléctrica del suelo es alta.

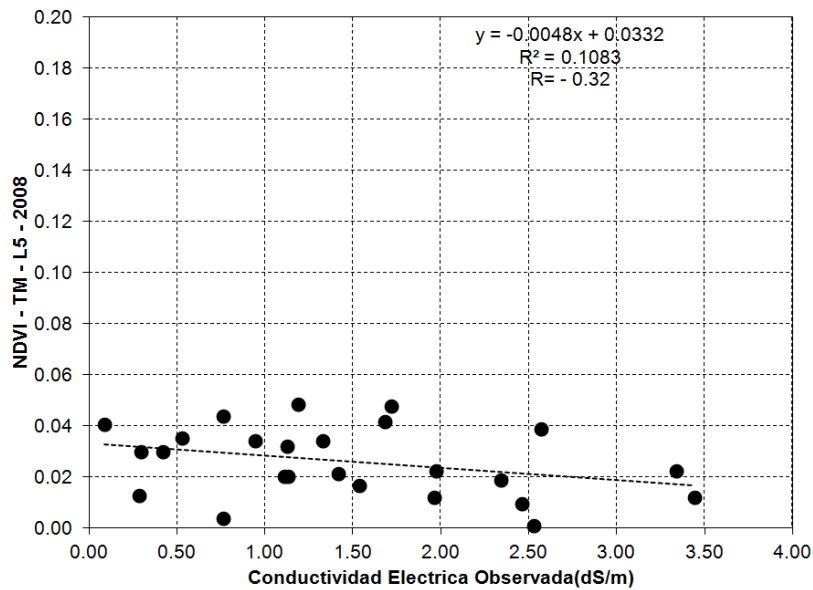


Figura 38. Gráfico de dispersión NDVI usando las bandas 3 y 4 del sensor TM (06-05-08) y la conductividad eléctrica del suelo en Ucupe (23-08-08).

6.5 Modelos de regresión lineal simple

La Tabla 12 muestra las ecuaciones que se obtuvieron de los modelos de regresión lineal simple obtenidos a partir de los valores de CE (dS/m), NDVI e IndSal para los sensores ASTER, TM y ETM+

Tabla 12. Modelos de regresión lineal simple.

Nº ECUACION	AREA DE ESTUDIO	FECHA DEL SENSOR	ECUACION	R
1	LA VIÑA	ASTER (2007/11/20)	CE= - 0.137(NDVI)+0.229	-0.84
2	LA VIÑA	ASTER (2007/11/20)	CE= 0.037(IndSal)+0.634	0.71
3	LA VIÑA	ETM+ (2007/12/22)	CE= - 0.212(NDVI)+0.307	-0.71
4	LA VIÑA	ETM+ (2008/02/08)	CE= - 0.089(NDVI)+0.657	-0.55
5	SALTUR	TM (2008/05/06)	CE= - 0.194(NDVI)+0.201	-0.34
6	SAN ANTERO	TM (2008/05/06)	CE= - 0.156(NDVI)+0.748	-0.73
7	UCUPE	TM (2008/05/06)	CE= - 0.004(NDVI)+0.033	-0.32

R: Representa el coeficiente de correlación lineal simple, CE: Conductividad eléctrica del suelo, IndSal: Índice de salinidad, NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada.

La primera ecuación de la tabla 12 relaciona los datos de NDVI y la CE usando la imagen ASTER para el área de La Viña obteniéndose una correlación alta negativa de -0.84. La segunda ecuación relaciona los datos de IndSal y la CE usando la imagen ASTER para el área de La Viña obteniéndose una correlación alta positiva de 0.71. La tercera ecuación relaciona los datos de NDVI y la CE usando la imagen ETM+ para el área de La Viña obteniéndose una correlación alta negativa de -0.71. La cuarta ecuación relaciona los datos de NDVI y la CE usando la imagen ETM+ para el área de La Viña obteniéndose una correlación media de -0.55.

La quinta ecuación relaciona los datos de NDVI y la CE usando la imagen TM para el área de Saltur obteniéndose una correlación negativa baja de -0.34. La sexta ecuación relaciona los datos de NDVI y la CE usando la imagen TM para el área de San Antero obteniéndose una correlación alta negativa de -0.73. La séptima ecuación relaciona los datos de NDVI y la CE usando la imagen TM para el área de Ucupe obteniéndose una correlación negativa baja de -0.32.

Estos resultados indican un acuerdo satisfactorio entre las estimaciones del NDVI y los valores de la conductividad eléctrica. No ocurriendo la misma situación para Saltur y Ucupe, debido a que la clase de suelo de estas dos áreas de estudio es textural moderadamente fina de tipo franco arcilloso en donde la napa freática es menor de 60 cm metros, este valor de la napa freática es muy importante ya que cuando la napa freática es menor a 60 cm la mayor concentración de sales se encontraran en la superficie del suelo y perjudicara la cobertura de la vegetación debido que las raíces de este cultivo se encuentra aproximadamente entre 30 cm a 60 cm de profundidad. De esta manera podemos justificar que el estado de salud de las plantas depende de un porcentaje muy elevado a causa de los efectos de la salinidad de sus suelos.

6.6 Modelos de regresión lineal múltiple

Para la primera ecuación de la Tabla 13 se relacionó los valores del NDVI, IndSal, componente principal 2 (PC2) del sensor ASTER, obteniéndose la siguiente estadística.

Coefficiente de la primera variable independiente = - 4.116

Coefficiente de la segunda variable independiente = 2.463

Coefficiente de la tercera variable independiente = - 3.069

Constante ó punto de intersección de la recta con el eje y = 1.005

Error típico del primer coeficiente = 0.978

Error típico del segundo coeficiente = 3.179

Error típico del tercer coeficiente = 2.010

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.76$

El error estándar para la estimación de la CE estimada = 0.058 dS/m

Para la segunda ecuación de la Tabla 13 se relaciona los valores del NDVI y las reflectancias de las bandas 5(b5) y 7(b7) de la imagen ETM+ (22/12/2007), obteniéndose la siguiente estadística.

Coeficiente de la primera variable independiente = 10.305

Coeficiente de la segunda variable independiente = 4.0129

Coeficiente de la tercera variable independiente = -4.0129

Constante ó punto de intersección de la recta con el eje y = -2.743

Error típico del primer coeficiente = 3.124

Error típico del segundo coeficiente = 2.354

Error típico del tercer coeficiente = 0.386

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.81$

El error estándar para la estimación de la CE estimada = 0.063 dS/m

Para la tercera ecuación de la Tabla 13 se relacionó los valores del NDVI y las reflectancias de las bandas 5(b5) y 7(b7) de la imagen ETM+ (8/02/2008), obteniéndose la siguiente estadística.

Coeficiente de la primera variable independiente = 9.697

Coeficiente de la segunda variable independiente = 6.343

Coeficiente de la tercera variable independiente = -0.533

Constante ó punto de intersección de la recta con el eje y = -2.173

Error típico del primer coeficiente = 3.013

Error típico del segundo coeficiente = 3.855

Error típico del tercer coeficiente = 0.386

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.649$

El error estándar para la estimación de la CE estimada = 0.168 dS/m

Para la cuarta ecuación de la Tabla 13 se relacionó los valores de las reflectancias de las bandas 5(b5) y 7(b7) de la imagen TM (6/05/2008), obteniéndose la siguiente estadística.

Coefficiente de la primera variable independiente = 1.740

Coefficiente de la segunda variable independiente = 1.928

Constante ó punto de intersección de la recta con el eje y = -0.491

Error típico del primer coeficiente = 2.4186

Error típico del segundo coeficiente = 2.244

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.56$

El error estándar para la estimación de la CE estimada = 0.095 dS/m

Para la quinta ecuación de la Tabla 13 se relacionó los valores del NDVI y los de las reflectancias de las bandas 3(b3) y 7(b7) de la imagen TM (6/05/2008), obteniéndose la siguiente estadística.

Coefficiente de la primera variable independiente = 21.268

Coefficiente de la segunda variable independiente = 2.37

Coefficiente de la tercera variable independiente = 1.466

Constante ó punto de intersección de la recta con el eje y = -1.951

Error típico del primer coeficiente = 5.245

Error típico del segundo coeficiente = 3.641

Error típico del tercer coeficiente = 1.341

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.85$

El error estándar para la estimación de la CE estimada = 0.094 dS/m

Para la sexta ecuación de la Tabla 13 se relacionó los valores de las reflectancias de las bandas 5(b5) y 7(b7) de la imagen TM (6/05/2008), obteniéndose la siguiente estadística.

Coefficiente de la primera variable independiente = 56.995

Coefficiente de la segunda variable independiente = 24.519

Constante ó punto de intersección de la recta con el eje y = -23.389

Error típico del primer coeficiente = 18.537

Error típico del segundo coeficiente = 16.474

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.67$

El error estándar para la estimación de la CE estimada = 0.553 dS/m

Tabla 13. Modelos de regresión lineal múltiple.

AREA DE ESTUDIO	FECHA DEL SENSOR	ECUACION
LA VIÑA	ASTER (2007/11/20)	$CE = -4.116(NDVI) + 2.463(IndSal) - 3.069(PC2) + 1.005$
LA VIÑA	ASTER (2007/11/20)	$CE = 10.305(b5) + 4.0129(b7) - 4.0129(NDVI) - 2.743$
LA VIÑA	ETM+ (2008/02/08)	$CE = 9.697(b5) + 6.343(b7) - 0.533(NDVI) - 2.173$
SALTUR	TM (2008/05/06)	$CE = 1.740(b5) + 1.928(b7) - 0.491$
SAN ANTERO	TM (2008/05/06)	$CE = 21.268(b3) - 2.37(b7) + 1.466(NDVI) - 1.951$
UCUPE	TM (2008/05/06)	$CE = 56.995(b5) - 24.519(b7) - 23.389$

6.7 Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada

A partir de la distribución espacial del NDVI e IndSal del sensor ASTER, TM y ETM+ y los modelos de regresión lineal múltiple de la Tabla 13 por ser más confiables y mediante el software IDL y ENVI 4.5, se asignaron a cada píxel de las sub imágenes un valor de conductividad eléctrica estimada, los cuales para un mejor estudio se clasificaron en rangos (Tabla 1); y con el propósito de editar dichos Mapas de distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada, a cada rango se le asignó un color específico cubriendo de esta forma todo el área de la imagen para cada área de estudio.

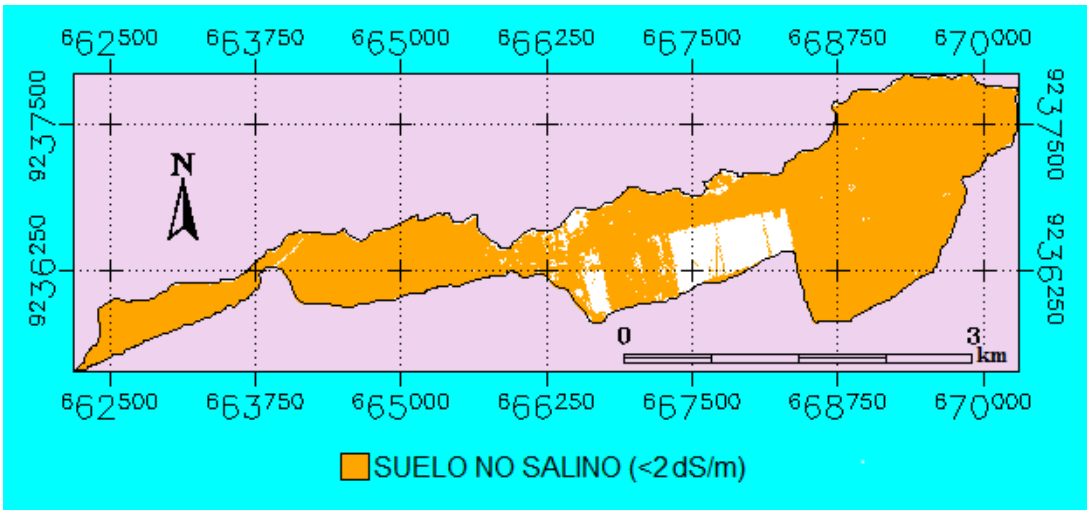


Figura 39. Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo del área de La Viña usando la imagen ASTER de la fecha 20 de noviembre del 2007.

En la Figura 39 los valores de la CE estimada (dS/m) para el área La Viña se encuentran entre los rango de 0 dS/m a 2 dS/m usando la imagen, ASTER por lo tanto esta área es suelo no salino. Esta distribución espacial se genero usando la primera ecuación de la Tabla 12. La distribución espacial de CE estimada que se encuentran de color blanco tiene valores negativos. El área total de la distribución espacial es de aproximadamente 623.4525 ha de las cuales se encontraron 555.5025 ha con suelos de CE estimada menor a 2 dS/m y 67.95 ha con suelos de CE estimada menor a 0 dS/m.

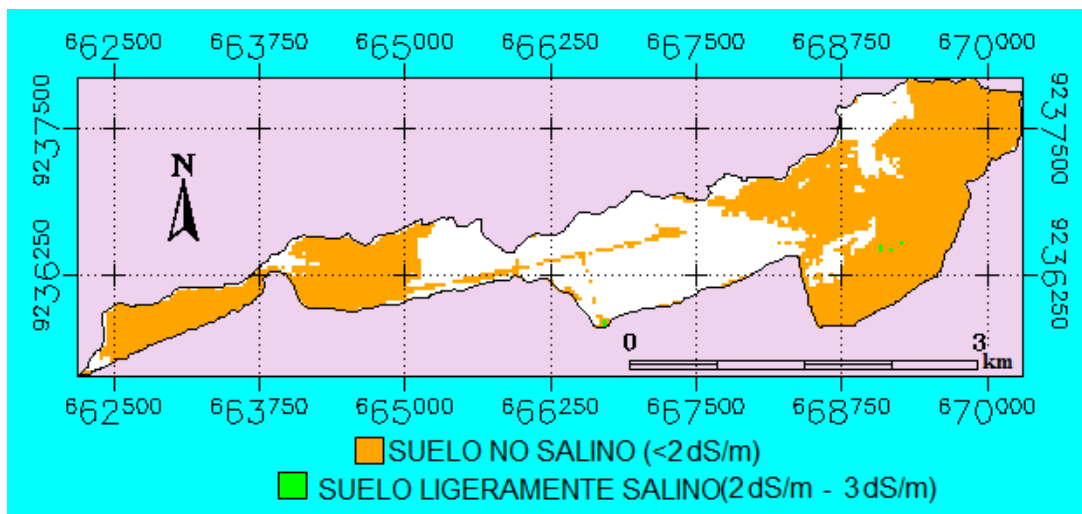


Figura 40. Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo del área de La Viña usando la imagen ETM+ de la fecha 22 de diciembre del 2007.

En la Figura 40, los valores de la CE estimada (dS/m) para el área La Viña se encuentran entre el rango de 0 dS/m a 3 dS/m usando la imagen ETM+ por lo tanto esta área es ligeramente salino en algunas zonas. Esta distribución espacial se generó usando la segunda ecuación de la Tabla 13. La distribución espacial de CE estimada que se encuentran de color blanco tiene valores negativos. El área total de la distribución espacial es de aproximadamente 623.4525 ha de las cuales se encontraron 373.4325 ha con suelos de CE estimada menor a 2 dS/m, 0.720 ha con suelos de CE estimada entre 2 dS/m a 3 dS/m y 249.3 ha con suelos de CE estimada menor a 0 dS/m.

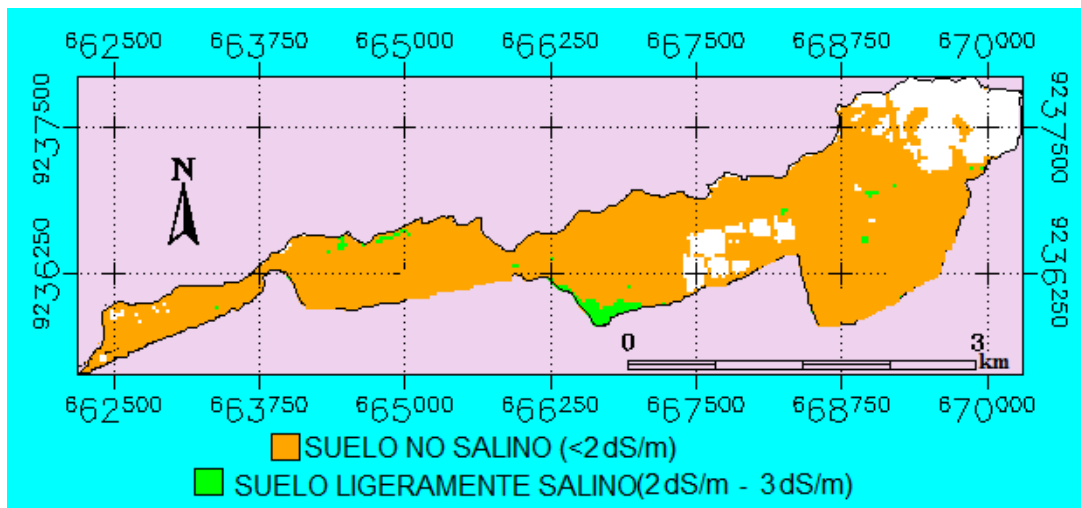


Figura 41. Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo del área de La Viña usando la imagen ETM+ de la fecha 8 de febrero del 2008.

En la Figura 41, los valores de la CE estimada (dS/m) para el área de La Viña se encuentran entre los rangos de 0 dS/m a 3 dS/m usando la imagen ETM+, por lo tanto, esta área es ligeramente salina en algunas zonas. Esta distribución espacial se generó usando la tercera ecuación de la Tabla 13. La distribución espacial de CE estimada que se encuentran de color blanco tiene valores negativos. El área total de la distribución espacial es de aproximadamente 623.4525 ha de las cuales se encontraron 519.6375 ha con suelos de CE estimada menor a 2 dS/m, 11.6325 ha con suelos de CE estimada entre 2 dS/m a 3 dS/m y 92.1825 ha con suelos de CE estimada menor a 0 dS/m.

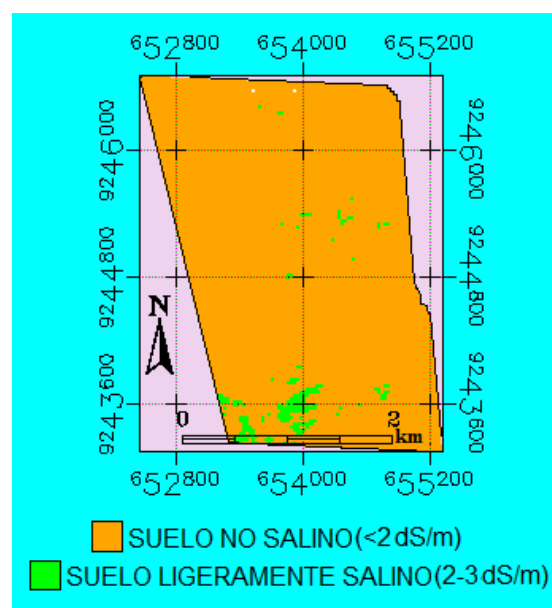


Figura 42. Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo del área de Saltur usando la imagen TM de la fecha 6 de mayo del 2008.

En la Figura 42, los valores de la CE estimada para el área de Saltur se encuentran entre los rangos de 0 dS/m a 3 dS/m usando la imagen TM, por lo tanto, esta área es ligeramente salino en algunas zonas. Esta distribución espacial se generó usando la cuarta ecuación de la Tabla 13. El área total de la distribución espacial es de aproximadamente 763.605 ha de las cuales se encontraron 744.8175 ha con suelos de CE estimada menor a 2 dS/m, 18.7875 ha con suelos de CE estimada entre 2 dS/m a 3 dS/m.

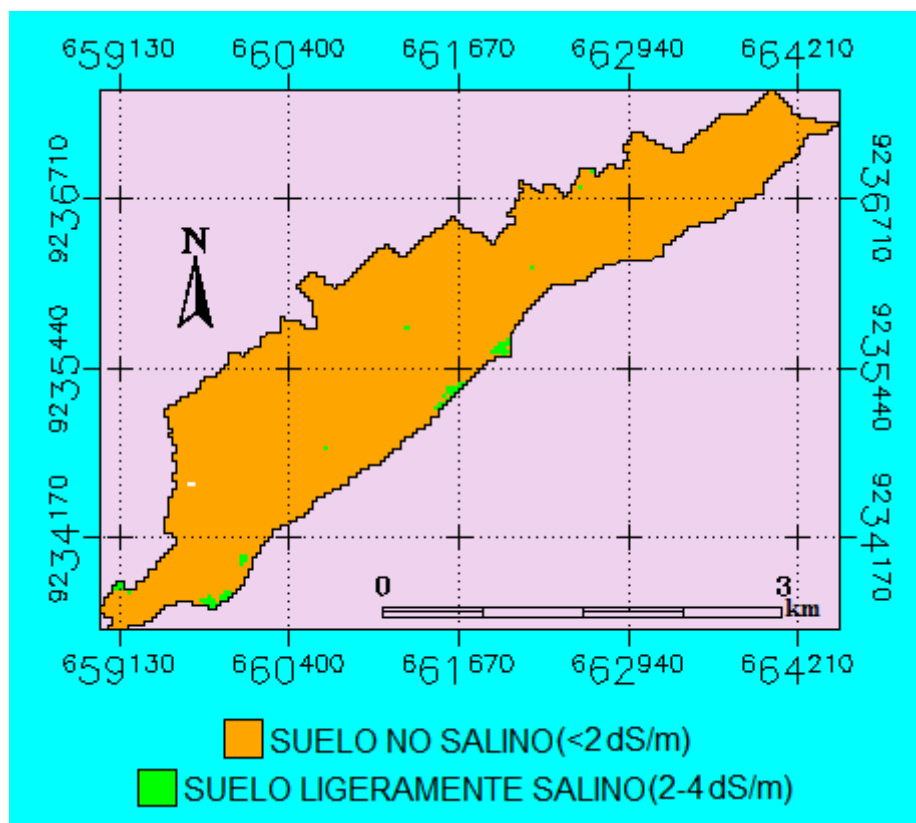


Figura 43. Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo del área de San Antero usando la imagen TM de la fecha 6 de mayo del 2008.

En la Figura 43, los valores de la CE estimada (dS/m) para el área de San Antero se encuentran entre los rangos de 0 dS/m a 4 dS/m usando la imagen TM por lo tanto esta área es ligeramente salina en algunas zonas. Esta distribución espacial se genero usando la quinta ecuación de la Tabla 13. El área total de la distribución espacial es de aproximadamente 550.3275 ha de las cuales se encontraron 540.7875 ha con suelos de CE estimada menor a 2 dS/m, 9.54 ha con suelos de CE estimada entre 2 dS/m a 4 dS/m.

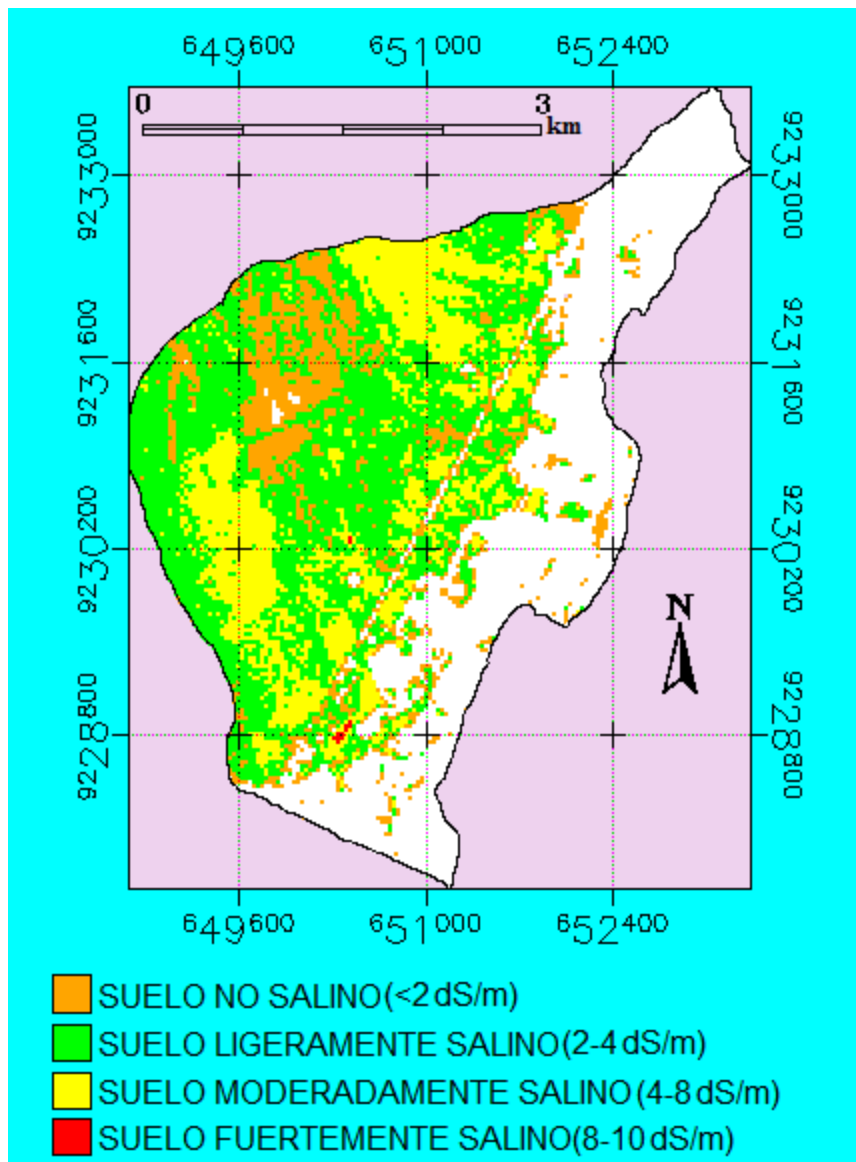


Figura 44. Distribución espacial de la conductividad eléctrica estimada del suelo del área de Ucupe usando la imagen TM de la fecha 6 de mayo del 2008.

En la Figura 44, los valores de la CE estimada (dS/m) para el área de Ucupe se encuentran entre los rangos de 0 dS/m a 10 dS/m usando la imagen TM por lo tanto esta área es fuertemente salina en algunas zonas. Esta distribución espacial se generó usando la sexta ecuación de la Tabla 13. El área total de la distribución espacial es de aproximadamente 1362.42 ha de las cuales se encontraron 175.635 ha con suelos de CE estimada menor a 2 dS/m, 474.165 ha con suelos de CE estimada entre 2 dS/m a 4 dS/m, 266.22 ha con suelos de CE estimada entre 4 dS/m a 8 dS/m, 1.08 ha con suelos de CE estimada entre 8 dS/m a 10 dS/m

En este trabajo de investigación se han desarrollado modelos de regresión lineal múltiple que permitirá a posibles interesados estimar la salinidad de los suelos de cualquier área de observación cultivadas de Algodón. Se determinaron seis modelos de regresión lineal múltiple con los valores de NDVI, IndSal, los componentes principales, los valores de reflectancia de las bandas y los valores de la conductividad eléctrica ; siendo el NDVI un parámetro físico muy importante que nos muestra el estado de salud o vigorosidad de las plantas; esto implica que para suelos menos salinos se presenta plantas más vigorosas, obteniéndose un valor de NDVI más alto y mientras va aumentando la salinidad del suelo el valor de la conductividad eléctrica aumenta y el NDVI de las plantas va disminuyendo.

6.8 Gráficos de dispersión de los valores de la CE estimada y la CE in-situ

En las Figuras 45, 46, 47, 48 ,49 y 50 se muestran la correlación entre la CE estimada y la CE in situ (ver anexo 4), vemos que hay una alta correlación de 0.78, 0.90, 0.73, 0.72, 0.95, 0.82 respectivamente,

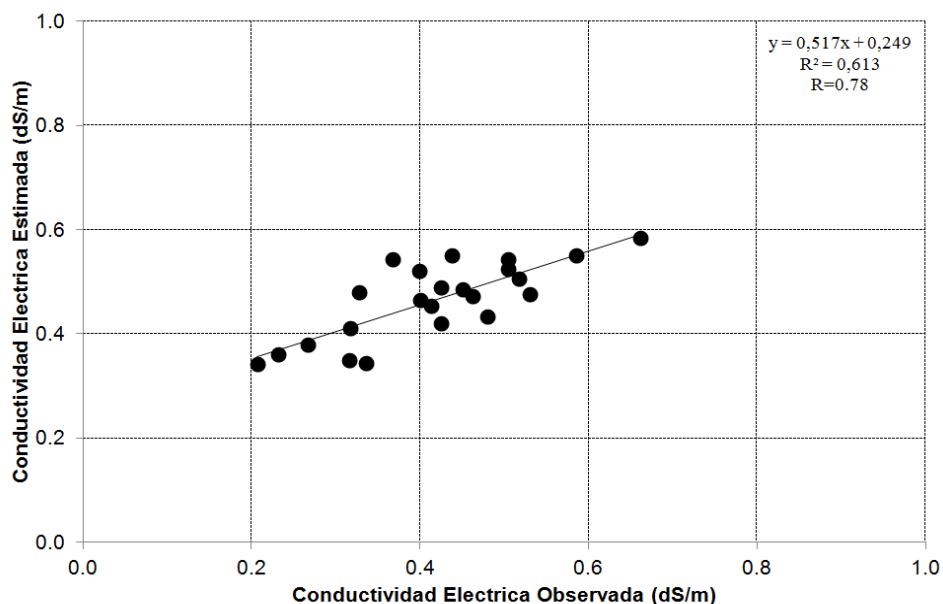


Figura 45. Gráfico de dispersión de la CE estimada (usando la primera ecuación de la Tabla 13) y la CE in situ para el área La Viña

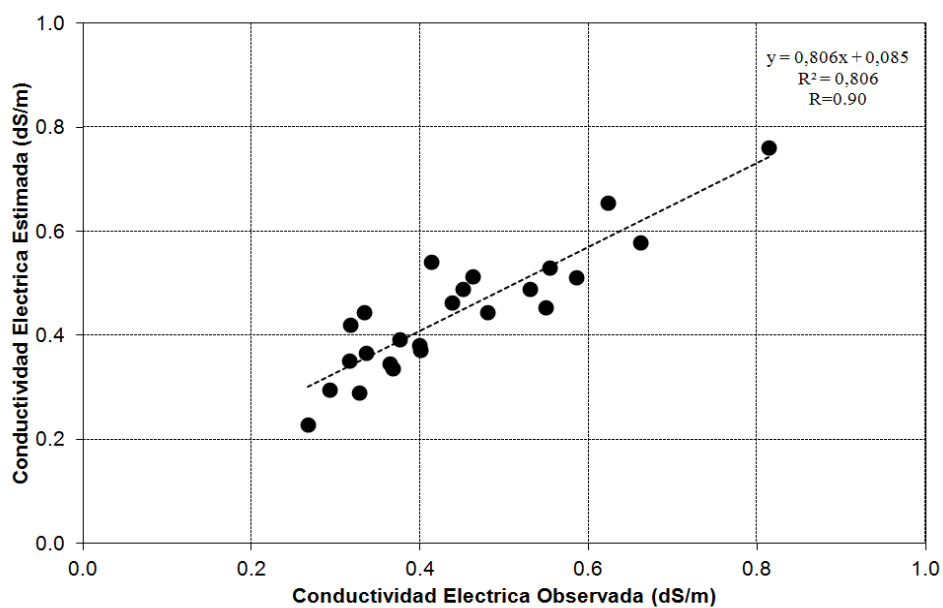


Figura 46. Gráfico de dispersión de la CE estimada (usando la segunda ecuación de la Tabla 13) y la CE in situ para el área La Viña

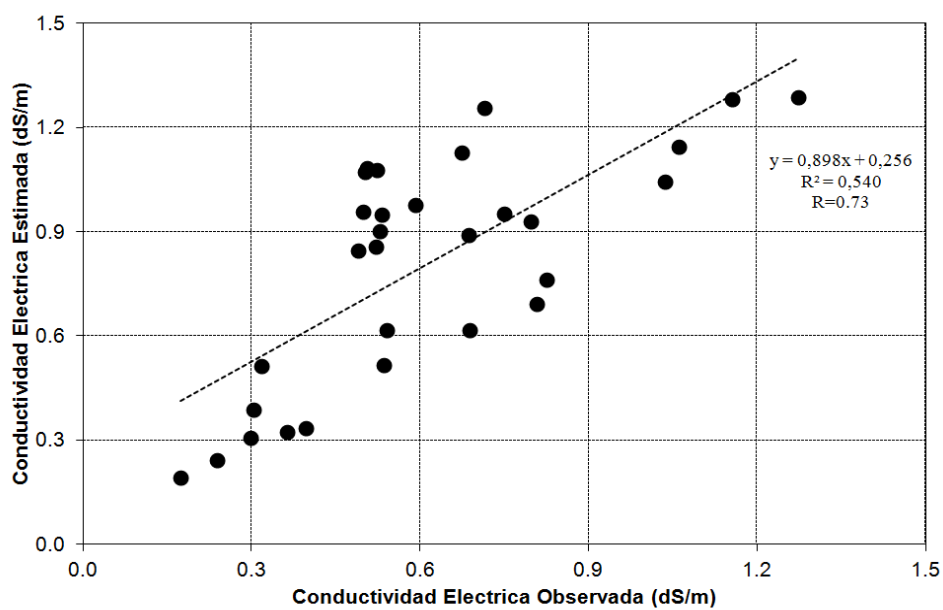


Figura 47. Gráfico de dispersión de la CE estimada (usando la tercera ecuación de la Tabla 13) y la CE in situ para el área La Viña

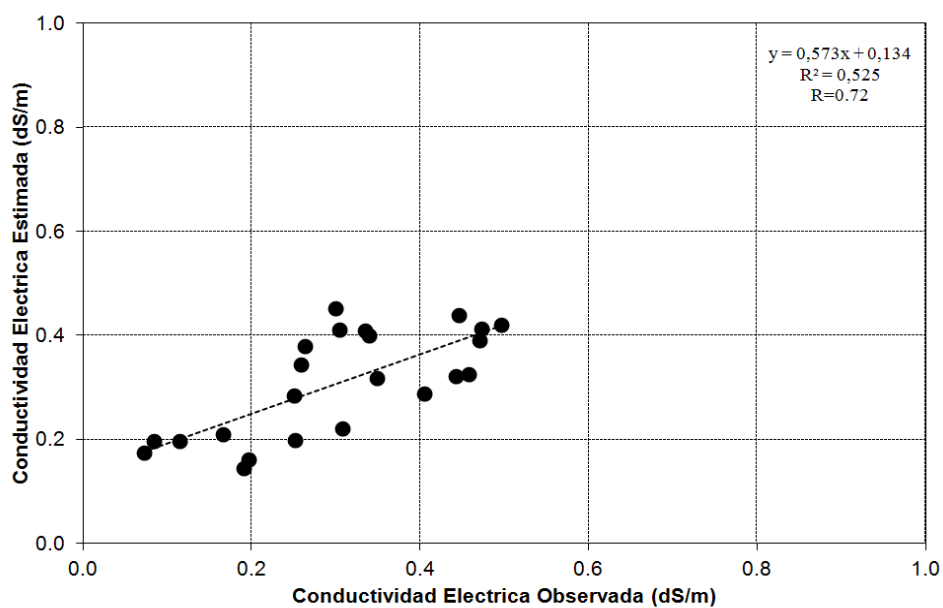


Figura 48. Gráfico de dispersión de la CE estimada (usando la cuarta ecuación de la Tabla 13) y la CE in situ para el área Saltur.

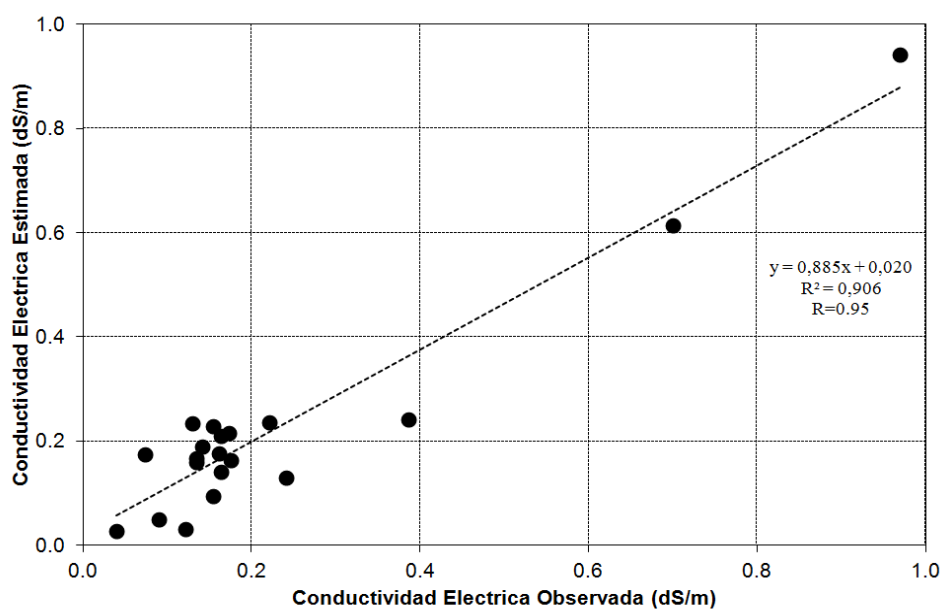


Figura 49. Gráfico de dispersión de la CE estimada (usando la quinta ecuación de la Tabla 13) y la CE in situ para el área San Antero.

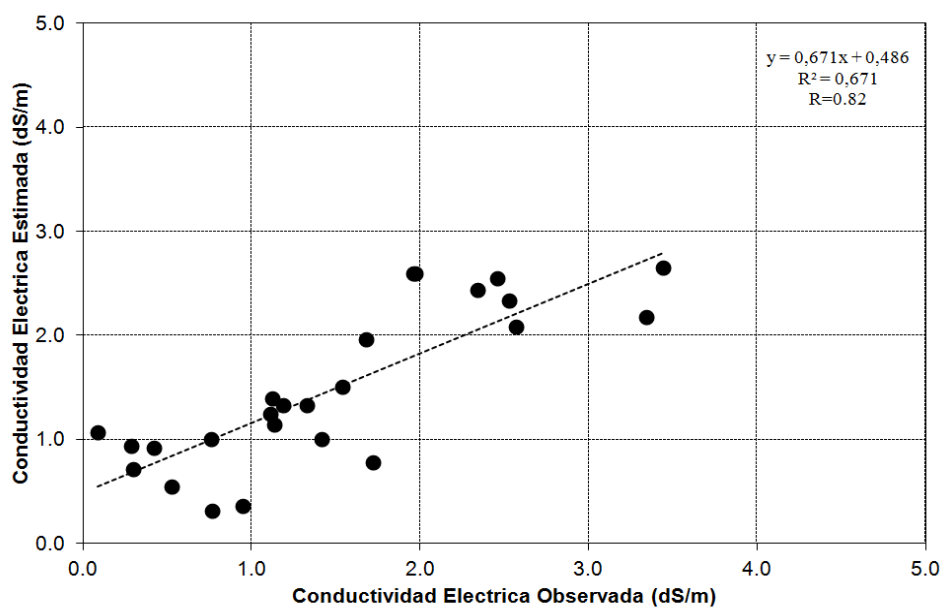


Figura 50. Gráfico de dispersión de la CE estimada (usando la sexta ecuación de la Tabla 13) y la CE in situ para el área Ucupe.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

La presente metodología cumplió con los objetivos de estimar la salinidad del suelo con el uso de imágenes de satélite y los datos in situ de conductividad eléctrica. Los modelos estadísticos de regresión lineal múltiple elaborados con los valores de la conductividad eléctrica, el índice de vegetación de diferencia normalizada, el índice de salinidad, el componente principal 2 y las reflectancias de las bandas de los datos de las imágenes satelitales, para estimar la salinidad presentaron coeficientes de correlación negativas ligeramente mayores que los modelos estadísticos de regresión lineal simple.

Las correlaciones de los datos de la CE estimada y la CE in-situ presentaron una alta correlación entre 0.72 y 0.95, por lo que es más confiable generar imágenes clasificados de salinidad de los Suelos con los modelos de regresión lineal múltiple. Las imágenes generadas por el procedimiento desarrollado en el presente trabajo pueden usarse para planificar adecuadamente el aprovechamiento del suelo, considerando que las áreas con mayores problemas de salinidad pueden requerir de la aplicación de prácticas agronómicas de rehabilitación de suelos y de cambio del patrón de cultivos.

La Teledetección resulta ser una herramienta fundamental para este tipo de estudios y la planificación territorial, lo cual proporciona resultados a corto plazo sobre la ubicación de las áreas afectadas por la salinidad.

7.2. Recomendaciones

Se recomienda que para futuras investigaciones las muestras de campo deben ser tomadas en plena fase terminal o final de su desarrollo vegetativo (al 50% de la floración), etapas en que las plantas desarrollan la más intensa actividad fisiológica, poseen una mayor cobertura vegetativa y en consecuencia se logra un mayor reflejo de la luz solar. Ya que en esta época, el efecto de la sales del suelo en las raíces de las plantas y en toda la planta es mayor que en etapas fisiológicas previas, por lo que es más fácil discriminar las áreas afectadas. La adquisición de las imágenes de satélite se

debe hacer en la fecha o fechas muy cercanas a los datos in situ de la conductividad eléctrica obtenidas.

Para un mejor estudio se debe tomar áreas agrícolas más extensas y con un mayor número de muestras repartidas por toda el área a investigar. Para futuras investigaciones recomendamos obtener modelos de regresión para otros tipos de cultivos y de esta manera cartografiar todas las áreas agrícolas que conforman los valles de esta región y obtener datos actualizados de salinidad en mapas digitales. Para futuras investigaciones en estas áreas y con el propósito de obtener resultados más precisos, se debe utilizar imágenes satelitales de sensores remotos con mayor resolución espacial.

Referencias Bibliográficas

1. Abrams, M., Hook, S. (1998), ASTER User Handbook, Version 1, NASA/Jet Propulsion Laboratory, Pasadena.pp.13-26
2. Adler G., M, Bernstein L., Levine R., Berk A., Richtsmeier C., Acharya P., Anderson G., Felde G., Gardner J., Hoke M., Jeong L, Pukall P., Ratkowski A., and Burke H., (1999). Atmospheric Correction for Short-waveSpectral Imagery Based on MODTRAN4. SPIE Proceedings on Imaging Spectrometry, Vol.3753, pp. 61-69.
3. Al-Khaier, F. (2003). Soil Salinity Detection Using Satellite Remote sensing, Thesis of M.Sc. in Geo-Information Science and Earth Observation, Watershed Management, Conservation and River Basin Planning specialization. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enscheda, the Netherlands, pp.51.
4. Chen X., Vierling L., Deering D. y Conley A. (2005). “Monitoring boreal forest leaf area index across a Siberian burn chronosequence: a MODIS validation study”. International Journal of Remote Sensing. Vol. 26, N° 24, pp.5435 – 5436.
5. Chuvieco E. (1990). Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid: Ediciones Rialp. PP 84-85.
6. Chuvieco E. (1996). Fundamentos de Teledetección espacial. Madrid. Ediciones RIALP. 568p.
7. Doorenbos, J., y Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33, Rome, Italy. pp.133.
8. Dwivedi, R.S. y B.R.M. Rao. (1992). The selection of the best possible Landsat TM band combination for delineating salt affected soils, Int. J. Remote Sensing, vol. 13, nº. 11, pp. 2051 – 2058.

9. Erdas Inc. (1999). Field Guide. Version 3, Earth Remote Sensing Data Analysis Center.pp.6-8
10. Fao. (1988). Salt- affected soils and their management. Bulletin No. 39, FAO, Rome.
11. Frulla, L. (1992). "Perturbaciones introducidas por la atmósfera y la superficie terrestre en las bandas ópticas de la radiación electromagnética solar. Su importancia en la teledetección." Laura Frulla. Tesis doctoral, Dto. de Física de la UBA.
12. Gao B. y Goetz, A. F. H., (1990). Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data: Journal of Geophysical Research, v. 95, no. D4, p. 3549-3564.
13. Geosystems, (2000), ATCOR2 for ERDAS Imagine, User Manual (version 1.7), a Spatiallyadaptive Fast Atmospheric Correction Algorithm (Germany: Geosystems GmbH), pp.33.
14. Ghassemi, F., A. J. Jakeman y H.A. Nix. (1995). Stalinization of land and water resources: human causes, extent, management and case studies. Canberra, Australia: The Australian National University, Wallingford, And Oxon, UK: CAB International.
15. Gyanesh Chander, Brian L. Markham y Dennis L. Helder. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors.pp.3-6.
16. Gomez G. E. (2006). Guía Básica de Conceptos de Radiometría y Fotometría, ESI-Universidad de Sevilla.pp.6-10.
17. Griffin, M.K. y Hsiao-Hua, K.B., 2003. Compensation of Hyperspectral data for atmospheric effects. Lincoln Laboratory Journal, 14(1), pp.29-53.
18. Gupta, R.K. y I.P. Abrol. (1990). Salt-affected soils: Their reclamation and management for crop production. In Advances in Soil Science, vol.11: 223-288.

19. Iqbal, M. (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press. New York, pp. 223.
20. Jensen, J. R. (2004). Introductory Digital Image Processing, A Remote sensing Perspective. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.pp.25.
21. Joshy, M.D. y B. Sahai. (1992). Mapping of salt-affected land in Saurashtra coast using Landsat satellite data, Int. J. Remote Sensing, Vol 14, n°. 10, pp.1515 –1529.
22. Kruse F. A., (2008), “Comparison of ATREM, ACORN, And FLAASH Atmospheric Corrections using low altitude AVIRIS data of Boulder, Co, USA”, http://www.hgimaging.com/FAK_Pubs.htm
23. Lira, J. y Oliver, A. (1983). A diffusion model to correct multi-spectral images for the path—radiance atmospheric effect. Mexico D.F.pp.55-57.
24. Markhan, B. y Barker, J. (1986). Landsat MSS and TM post-calibration dynamics range, exoatmospheric reflectance and at satellite temperature. EOSAT. Landsat Technical Notes. pp.3-8.
25. Matthew, M.W., S.M. Adler-Golden, A. Berk, S.C. Richtsmeier, R.Y. Levine, L.S. Bernstein, P.K. Acharya, G.P. Anderson, G.W. Felde, M.P. Hoke, A. Ratkowski, H.-H Burke, R.D. Kaiser, and D.P. Miller, 2000, “Status of Atmospheric Correction Using a MODTRAN4-based Algorithm,” SPIE Proceeding, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI, Vol. 4049, pp. 199-207.
26. Ministerio de Agricultura. (2008). Oficina de Información Agraria.
27. Pérez J, D. (2007), Introducción a los Sensores Remotos-Aplicaciones en Geología. Laboratorio de Tectónica Andina, Ciudad Universitaria, Pabellón 2, C1428EGA, Buenos Aires, Argentina.pp.27-30.
28. Prashant, K. (2007). Atmospheric Correction Models for Retrievals of calibrated Spectrals Profiles from Hyperion EO-1 Data. Pp.20.

29. Pulido, L. (1997). Aplicación de imágenes de satélite para identificar la salinidad del suelo y las áreas con mal drenaje, VII Congreso Nacional de Irrigación, pp.10-14, Hermosillo, Sonora, México, 22-24 octubre.
30. Rahman, H y G. Dedieu (1994). SMAC: A simplified method for the atmospheric of satellite measurements in the solar spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, vol 15, pp.123-143.
31. Rhoades. J.D. (1990). Soil salinity – causes and controls. In *Techniques for desert reclamation*, School of Geography University of Oxford. pp. 109–134.
32. Richards, J.A.(1986). *Remote Sensing Digital Image Analysis*.pp.51-52
33. Richards, L.A. (1954). *Diagnosis and improvements of saline and alkali soils*. U.S. Salinity Laboratory DA, US Dept. Agr. Hbk 60, pp.160
34. Schmid, T., M. Koch, y J. Gumuzzio. (2005). Multisensory approach to determine changes of wetland characteristics in semiarid environments (Central Spain). *IEEE, Trans. on Geosci. And Remote Sensing* 43: pp.2516-2525.
35. Singh, A.N. (1994). Monitoring changes in the extent of salt-affected soils in northern India, *Int. J. Remote Sensing*, Vol.15, n°.16, pp.3173-3182.
36. Slater, P.N. (1980) *Remote Sensing: Optics and Optical Systems*. Addison Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, pp.575.
37. Smith, J. A., Tzeu L. L., and Ranson, K. J. (1980). The Lambertian Assumption and Landsat Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 46 (9), pp.1183-1189.
38. Sobrino, J. A. (Ed.) (2000). *Teledetección*. España: Servicios de publicaciones, Universidad de Valencia.pp.19.
39. Sumner, M. E., y R. Naidu. (1998). *Sodic Soils. Distribution, Properties, Management, and Environmental Consequences*. University of Oxford. New York. pp.207.

40. Szabolcs, I. (1979). Review of research on salt-affected soils. *Nature Resource Res.*, vol. 15:137.
41. Szabolcs, I. (1987). The global problems of salt affected soils. *Acta Agronomica Hungarica*, Vol 36:159-172.
42. Tipler, A. P. y Llewellyn, A. R. (2000). *Modern Physics*. USA: Freeman..
43. Wiegand, C.L, J.D. Rhoades, J.H. Everitt y D.E. Escobar. (1992). Comparison of Photography, videography and Spot-1 HRV digital observations for salinity assessment in the San Joaquin Valley of California. En *Proceedings of the international Symposium of Land Reclamation; Advances in Research and Technology*. Edited by T. Younos, P.
44. Wiegand, C. L., J. D. Rhoades, D. E. Escobar y J. H. Everitt. (1994). Photographic and Videographic observations for determining and mapping the response of cotton to soil salinity. *Remote Sens. Environ.* 48: 1-25.
45. Williams, D. (2004), *Landsat-7 Science Data User's Handbook*, Acquired http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html (fecha de acceso 2009), National Aeronautics and Space Administration.

ANEXO 1

DEFINICIONES Y MAGNITUDES RADIOMÉTRICAS BÁSICAS

Energía Radiante (Q) : Es la cantidad de energía que incide sobre una superficie de área dada en un periodo de tiempo dado. En principio, se incluyen todas las longitudes de onda contenidas en la radiación. Si es preciso, debe indicarse explícitamente el rango de $\Delta\lambda$ considerado.

Energía Radiante Espectral (Q_λ) : Es la energía radiante por intervalo unitario de longitud de onda (J/nm o J/ μm)

$$Q_\lambda = \frac{dQ}{d\lambda}$$

Flujo Radiante (Φ) : Es el flujo de energía por unidad de tiempo ($W = J/s$)

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

No obstante, cuando la radiación incide en un dispositivo que produce una señal (voltaje u otra) proporcional a la radiación incidente, la magnitud importante es la “cantidad total de flujo” en vez del flujo por unidad de área, por lo que en estos casos, resulta necesario especificar la extensión espacial del campo de radiación cuyo flujo se está considerando.

Flujo Radiante Espectral (Φ_λ): Es el flujo de energía radiante por unidad de tiempo t unidad de onda. Se mide en W/nm.

$$\Phi_\lambda = \Phi_\lambda(\lambda) = \frac{dQ_\lambda}{dt} = \frac{d\Phi}{d\lambda}$$

La distribución espectral del flujo radiante es, como veremos, muy importante para la mayoría de aplicaciones, incluyendo la caracterización de un detector en función de la energía incidente.

Irradiancia(E): Es la densidad de flujo radiante por unidad de superficie que incide sobre un punto en la superficie especificada. Deben incluirse todas las direcciones comprendidas en el ángulo semiesférico por encima o por debajo del punto en la superficie. Se mide en W/m^2

$$E = \frac{d\Phi}{dS_0}$$

La irradiancia saliente de una superficie se denomina emitancia (M) y tiene las mismas unidades y expresión para su definición. La Emitancia también se ha denominado, en el pasado, emitancia, aunque este término se aplica en la actualidad como equivalente a la emisividad, propiedad de la superficie del elemento emisor.

Intensidad Radiante (I) : Es la densidad de flujo radiante por unidad de ángulo solido incidente en un punto en el espacio propagándose en una dirección específica.

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

Intensidad Radiante Espectral (I_λ): Es el flujo radiante por unidad de ángulo solido y por unidad de longitud de onda incidente en un punto en el espacio propagándose en una dirección específica. Se mide en $W/(sr \cdot nm)$.

$$I_\lambda = \frac{dI}{d\lambda} = \frac{d^2Q\lambda}{d\omega dt} = \frac{d^2\Phi}{d\omega dt}$$

Radiancia (L): Es la densidad de flujo radiante por unidad de área y de ángulo solido, incidente o emitido por un elemento de superficie en un punto en el espacio propagándose en una dirección específica, Figura 51. Se mide en $(Wm^{-2}sr^{-1})$.Su ecuación de definición es:

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega dt} = \frac{d^2\Phi}{d\omega dS_0 \cos\theta}$$

Donde $dS = dS_0 \cos\theta$ es una magnitud denominada "área proyectada" que es el área de la proyección de la superficie elemental dS_0 .

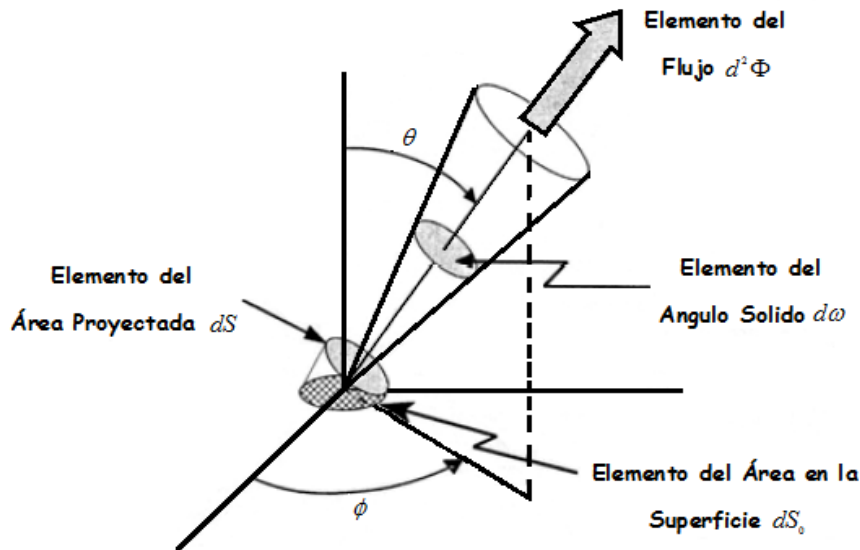


Figura 51. Radiancia

Radiancia Espectral(L_λ): Es la densidad espectral de Radiancia medida en ($\text{Wm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$)

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{d^3\Phi}{d\omega dS_0 \cos\theta d\lambda}$$

Emisores Lambertianos: Cualquier superficie, real o imaginaria, cuya radiancia sea independiente de la dirección considerada se denomina emisor(o radiador), Lambertianos puesto que verifica la ley de Lambert del Coseno: la irradiancia (o Emitancia) desde un elemento cualquiera de área sobre la superficie varía como el coseno del ángulo θ entre la dirección de la normal a la superficie, Figura 52.

$$E(\theta) = E(0)\cos\theta$$

Y la radiancia es, por tanto, independiente de la dirección en que se evalúa. Esta “ley del coseno” se puede considerar en varios sentidos. El rectángulo de longitud L y anchura W recibe el flujo radiante del haz de Irradiancia E_0 cuya dirección de incidencia forma un ángulo θ con la normal a la superficie (Gomez, 2006).

$$\Phi = \Phi_0 \rightarrow EA = E_0A_0 \rightarrow E = E_0\cos\theta$$

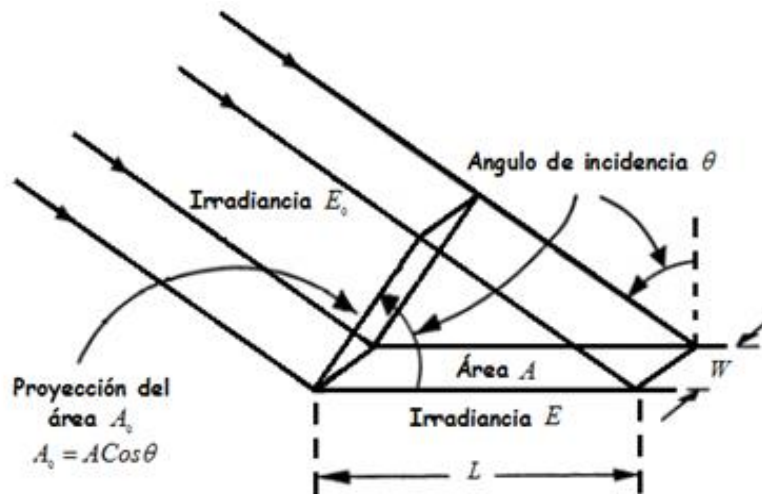


Figura 52. Geometría de un Emisor Lambertiano

Consideraciones físicas geométricas de interés para el cálculo de algoritmos de corrección atmosférica

Los procesos de atenuación provocados por la presencia de la atmósfera, así como la mezcla de distintas fuentes en la radiancia detectada por el sensor, adicionan un componente difuso para la discriminación de las verdaderas cantidades físicas. Uno de los principales efectos provocados por la atmósfera en los datos de los sensores remotos es el denominado efecto de adición de radiancia atmosférica, se refiere a la adición de radiancia al camino radiante captado por el sensor con respecto al terreno de la escena y se le denomina “upwelling”, la cantidad de radiancia atmosférica tipo “upwelling” es función de variables como la altura del sensor, las condiciones de nubosidad, el ángulo cenital solar, el rango de sensibilidad del sensor, el ángulo de visión desde el nadir y acimut con respecto al sol (Laura,1992).

Influencia de la altura del sensor y condiciones de nubosidad

La mayor altura del sensor o la mayor nubosidad atmosférica generan una mayor radiancia atmosférica de tipo “upwelling”. La Figura 53 muestra la exitancia radiante emergiendo desde la cima de la atmósfera terrestre donde la superficie de la tierra asume ser un reflector lambertiano de $\rho = 0.1$ y sólo la dispersión Rayleigh es asumida. El componente M_1 es debido al flujo esparcido hacia arriba y fuera de la atmósfera por la propia atmósfera. M_2 es la exitancia radiante debida al componente del flujo incidente

reflectado desde la superficie terrestre y a través de la cima de la atmósfera. El flujo radiante total que emerge desde la cima de la atmósfera. M está dado por $M = M_1 + M_2$. Note que en este caso $M_2 > M_1$ sólo cuando el espesor óptico es menor que 0.08 o la transmitancia es mayor que 0.92, correspondiente a una muy limpia atmósfera (Slater, 1980).

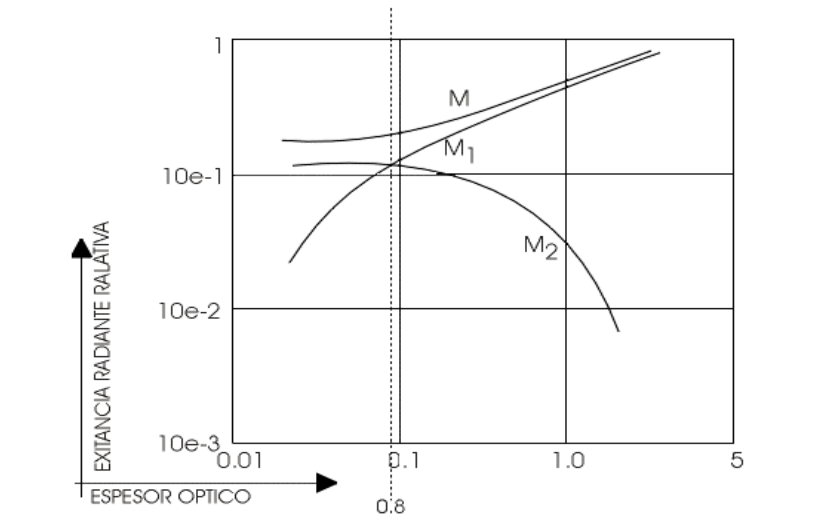


Figura 53. Exitancia radiante computada (Slater, 1980).

Angulo cenital solar

El Angulo cenital solar y la altitud del Sol o ángulo de elevación solar, como se define en la Figura 54, son ángulos complementarios que describen la posición del sol con relación al zenit y al plano ortogonal al zenit, respectivamente. La posición del sol es un factor en la cantidad de radiación atmosférica incidente presente, de la cantidad de irradiancia en el terreno y radiancia atmosférica tipo “upwelling” detectada por el sensor.

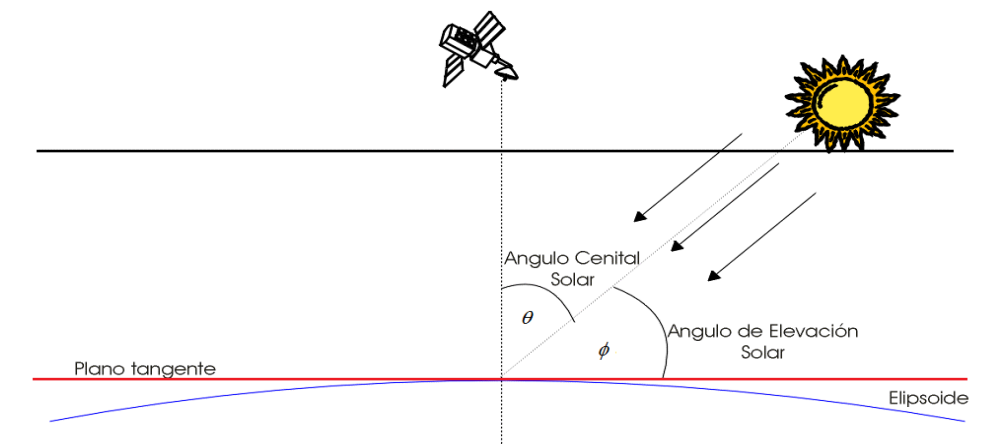


Figura 54. Ángulo Cenital Solar (Slater, 1980).

Cuando se habla de la influencia del ángulo cenital solar, se acostumbra a emplear el término iluminancia, el cual influye en la cantidad de energía radiante recibida por la superficie. Se plantea un ejemplo de mediciones de iluminancia atmosférica obtenidas para fotografías aéreas de gran altitud las cuales son mostradas en la Figura 55, la cual indica que cuando el ángulo cenital solar aumenta desde 0° , la iluminancia atmosférica aumenta debido al gran volumen dispersado, causado por el largo camino del flujo solar a través de la atmósfera. Para el cálculo de la reflectancia verdadera del terreno muchos algoritmos de correcciones atmosféricas acostumbran efectuar una estimación de las magnitudes de radiancia solar y de iluminancia a partir del conocimiento de la posición de la tierra en la eclíptica para un determinado instante de tiempo y para una constante de transmisividad solar establecida (Slater, 1980).

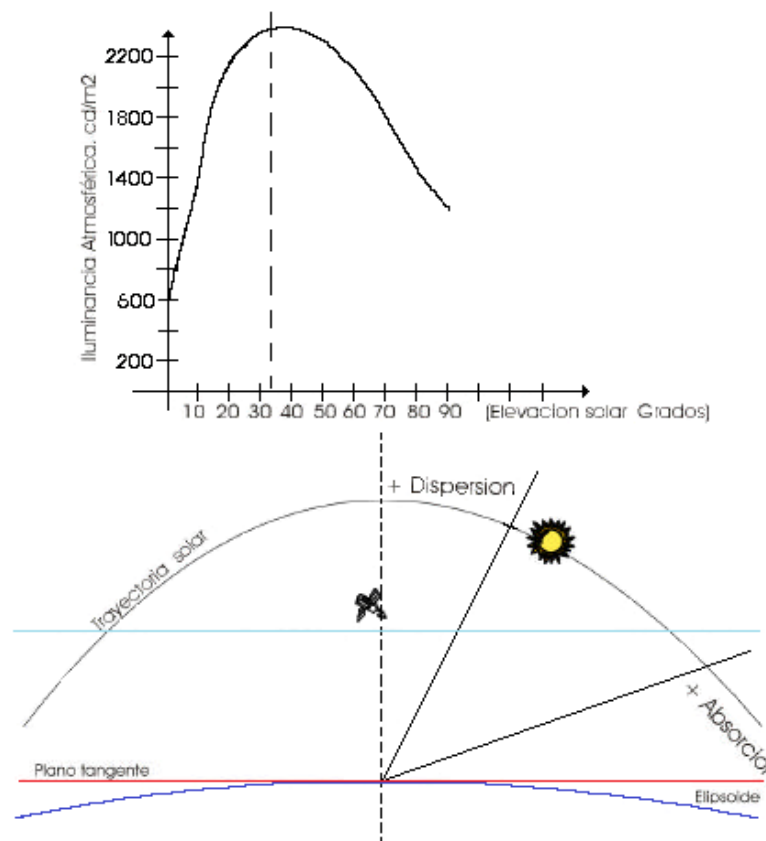


Figura 55. Iluminancia atmosférica y el ángulo de elevación solar (Slater, 1980).

Distancia Tierra - Sol

La distancia tierra – sol posee una magnitud que varía con la posición de la Tierra en la eclíptica para un instante de tiempo. A finales del siglo XVII se demostró que las órbitas de los planetas poseen una forma elíptica en las cuales el sol ocupa un foco de la

elipse. La Figura 56 muestra que para valores de 0° en el ángulo α , la Tierra se encuentra en la posición más cercana al Sol llamada perihelio; cuando α es igual a 180° la Tierra se encuentra en la posición más distante al Sol, denominada afelio.

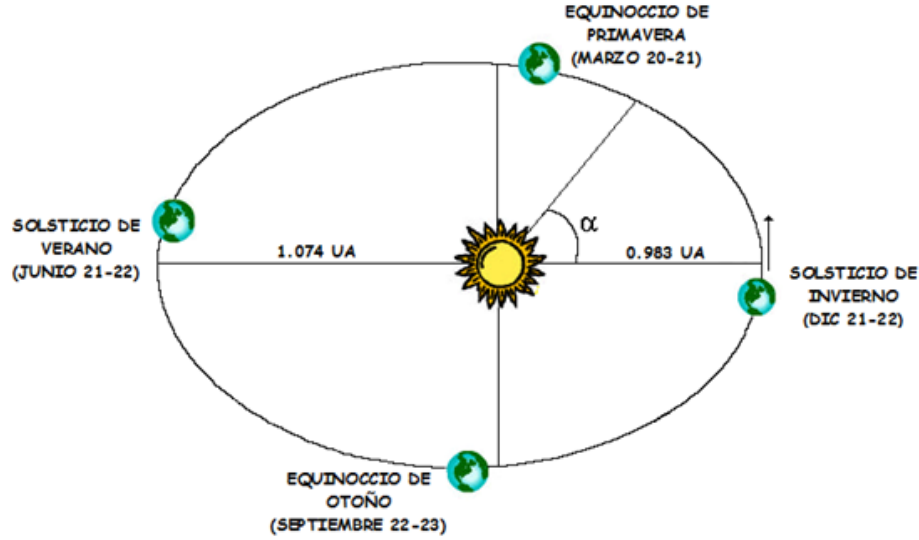


Figura 56. Posición de la Tierra con respecto al Sol.

Para efectos radiométricos, la distancia también suele expresarse a través de una ecuación obtenida por Spencer (Gómez, 2006), quien expresó esta distancia en términos de una serie de Fourier cuyo valor máximo es del 0.01% así:

$$\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1.00011 + 0.034221\cos\alpha + 0.00128\sin\alpha + 0.000719\cos 2\alpha + 0.000077\sin 2\alpha \quad (1)$$

En donde α , en radianes, es llamado ángulo del día. Esto es representado por

$$\alpha = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} \quad (2)$$

Y d_n es el número del día del año, r_0 es la distancia promedio Tierra-Sol que es igual a 149.46×10^6 km (1 unidad astronómica), r es la distancia Tierra-Sol, la ecuación 1 también puede ser expresado de la siguiente manera (Iqbal, 1983).

$$\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = d^{-1} = \left(1 - 0.01672 * \cos\left(\text{RADIAN}(0.9856 * (d_n - 4))\right)\right)^{-1} \quad (3)$$

ANEXO 2

UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

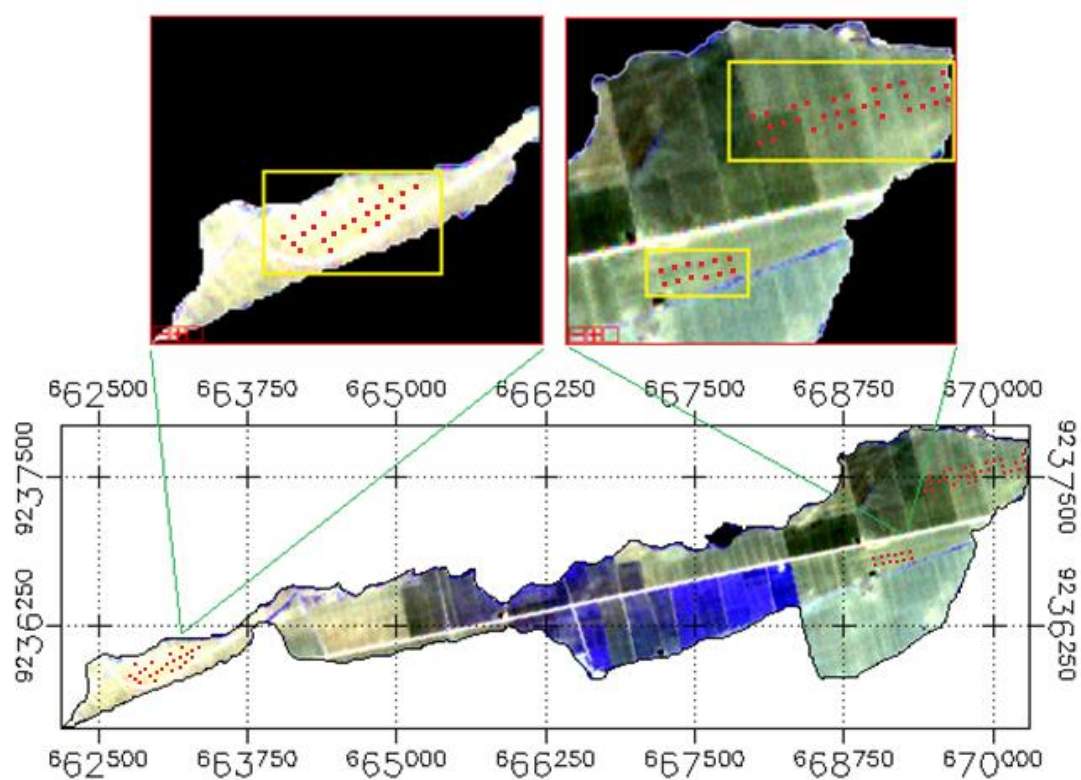


Figura 57. Muestra los puntos de los datos in situ de La Viña

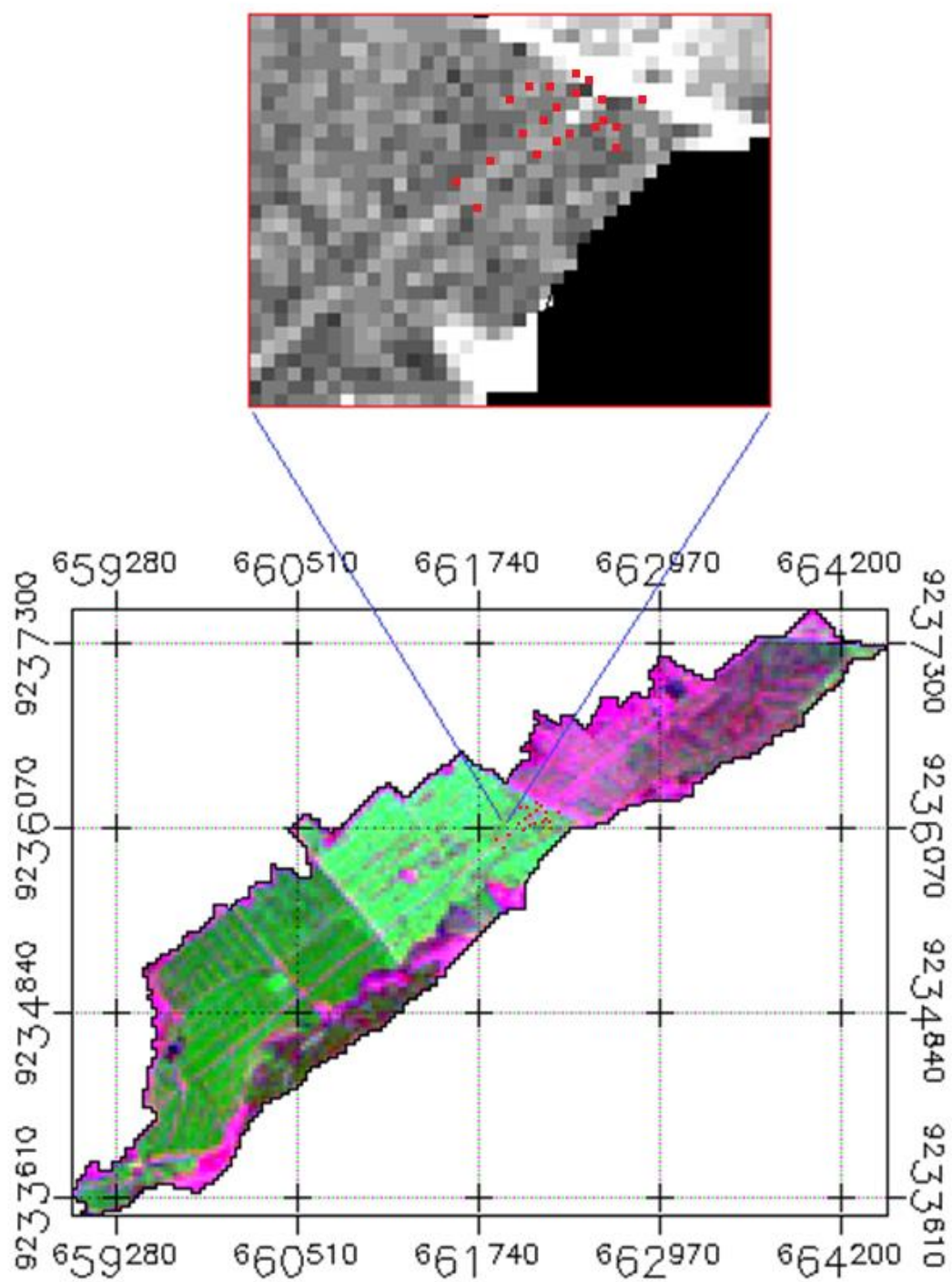


Figura 58. Muestra los puntos de los datos in situ de San Antero

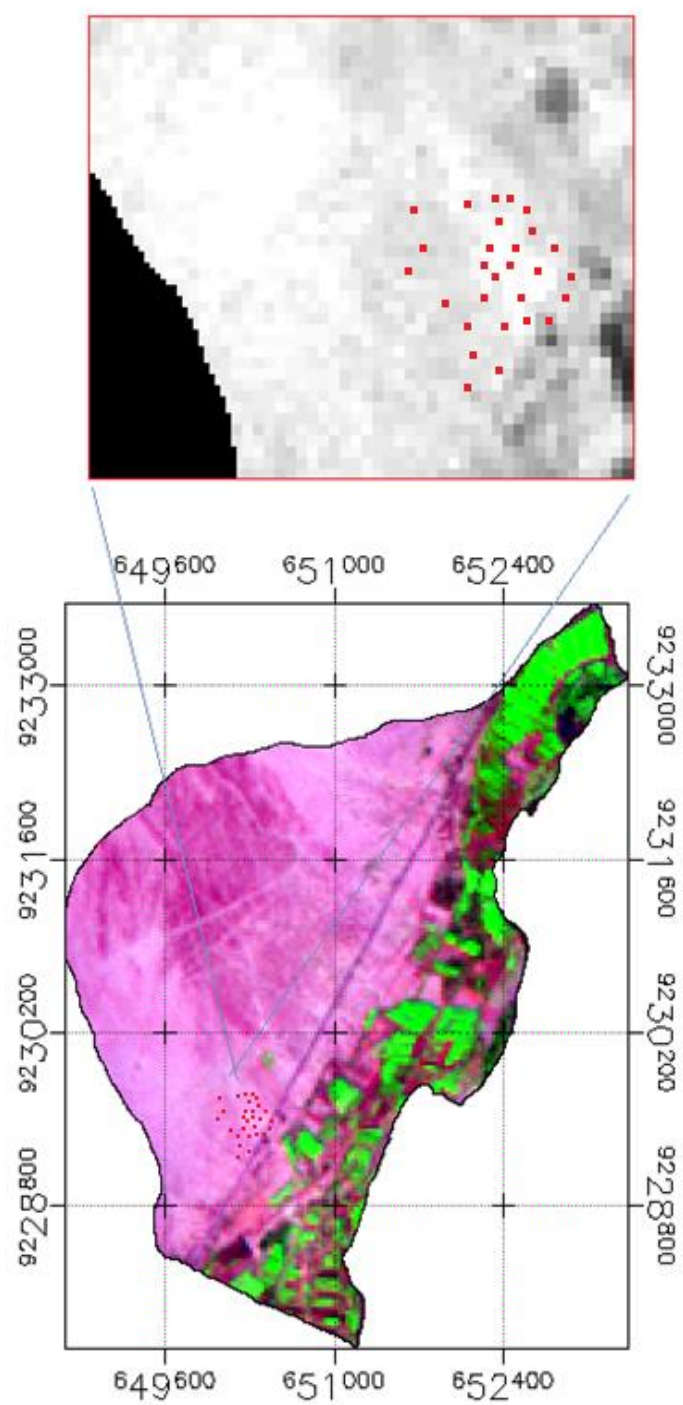


Figura 59. Muestra los puntos de los datos in situ de Ucupe

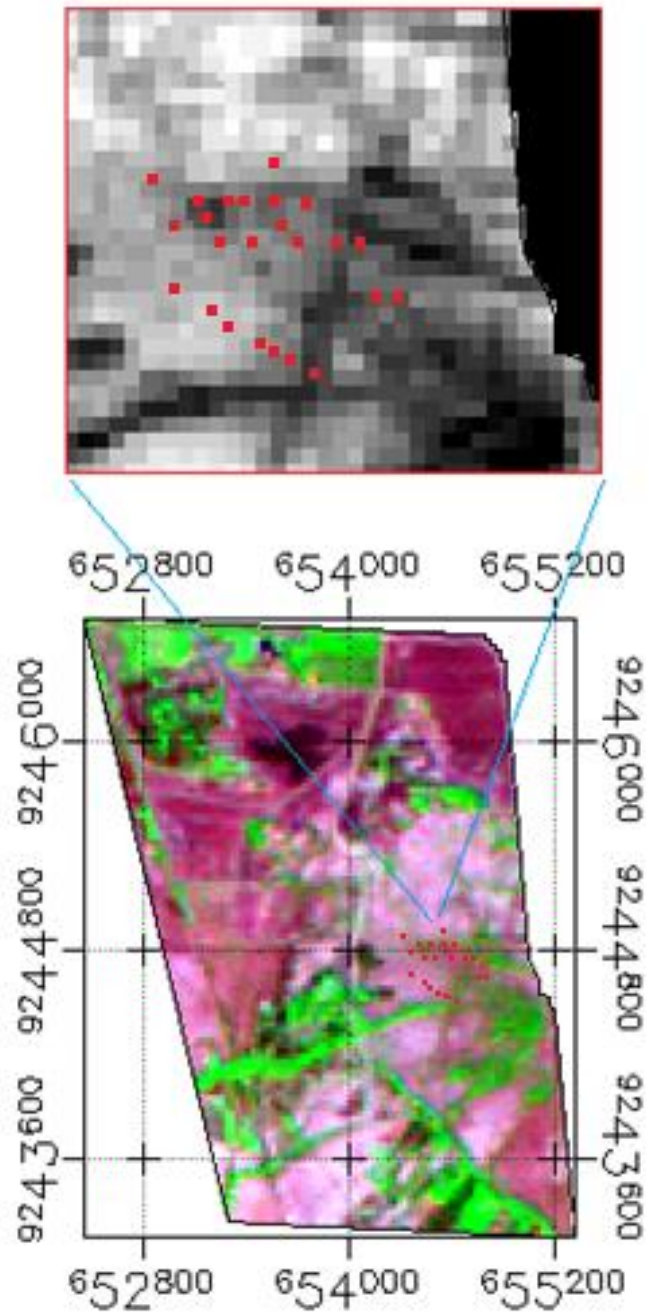


Figura 60. Muestra los puntos de los datos in situ de Salter

ANEXO 3

PRE-PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES USANDO IDL

A continuación se presentan los programas utilizado en el análisis y procesamiento de las imágenes de los sensores ASTER, ETM+ y TM usando el lenguaje de programación IDL.

Procesamiento de la imagen ASTER usando IDL

PRO CALIBRACION_ASTER_VNIR

```
FileID = EOS_SW_OPEN('D:\ASTER\AST_L1A.hdf', / Read)
```

```
NSwath = EOS_SW_INQSWATH('D:\ASTER\AST_L1A.hdf', SwathList)
```

```
; Obteniendo información de la banda 1
```

```
; Adjuntando objeto imagen
```

```
SwathID      = EOS_SW_ATTACH (FileID,'VNIR_Band1')
NField       = EOS_SW_INQDATAFIELDS (SwathID, FieldList, DataRank, DataType)
FieldArr     = STRSPLIT (FieldList, ",", /Extract)
```

```
; Leyendo datos de calibración
```

```
InfoCalResult = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (8), CalRank1, CalDims1, CalNType1, CalDList1)
ReadCalResult = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (8), Cal1)
```

```
; Leyendo datos de la imagen VNIR banda 1
```

```
InfoResult    = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (7), Rank1, Dims1, NType1, DList1)
ReadResult    = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (7), B1)
Status        = EOS_SW_Detach(SwathID)
```

```
; Obteniendo información de la banda 2
```

```
SwathID      = EOS_SW_ATTACH(FileID,'VNIR_Band2')
NField       = EOS_SW_INQDATAFIELDS(SwathID, FieldList, DataRank, DataType)
FieldArr     = STRSPLIT(FieldList, ",", /Extract)
```

```
; Leyendo datos de calibración
```

```
InfoCalResult = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (8), CalRank2, CalDims2, CalNType2, CalDList2)
ReadCalResult = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (8), Cal2)
```

```
; Leyendo datos de la imagen VNIR banda 2
```

```
InfoResult    = EOS_SW_FieldInfo (SwathID, FieldArr (7), Rank2, Dims2, NType2, DList2)
ReadResult    = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (7), B2)
Status        = EOS_SW_Detach (SwathID)
```

```
; Obteniendo información de la banda 3n
```

```
SwathID      = EOS_SW_ATTACH (FileID,'VNIR_Band3N')
NField       = EOS_SW_INQDATAFIELDS (SwathID, FieldList, DataRank, DataType)
FieldArr     = STRSPLIT (FieldList, ",", /Extract)
```

```
; Lee datos de calibración
```

```
InfoCalResult= EOS_SW_FieldInfo (SwathID, FieldArr (8), CalRank3n, CalDims3n, CalNType3n, CalDList3n)
```

```
ReadCalResult= EOS_SW_ReadField (SwathID, FieldArr (8), Cal3n)
```

```
; Lee datos de la imagen VNIR banda 3n
```

```
InfoResult      = EOS_SW_FieldInfo (SwathID, FieldArr (7), Rank3n, Dims3n, NType3n, DList3n)
ReadResult      = EOS_SW_ReadField (SwathID, FieldArr (7), B3n)
Status          = EOS_SW_Detach (SwathID)
Status          = EOS_SW_Close(FileID)
```

```
; Declaracion de las Variables
```

```
L1      = fltarr (4100,4200)
L2      = fltarr (4100, 4200)
L3n     = fltarr (4100, 4200)
```

```
; Calibración de la bandas 1,2 y 3
```

```
FOR i = 0, 4099 DO FOR j = 0, 4199 DO BEGIN
  L1(i,j) = Cal1(1,i)* B1(i,j) / Cal1(2,i) + Cal1(0,i)
  L2(i,j) = Cal2(1,i)* B2(i,j) / Cal2(2,i) + Cal2(0,i)
  L3n(i,j) = Cal3n(1,i)*B3n(i,j) / Cal3n(2,i) + Cal3n(0,i)
ENDFOR
```

```
; Visualización de los datos
```

```
sizeL1 = rebin (L1, 410,420)
rL1     = rotate (sizeL1, 7)
sizeL2 = rebin (L2, 410,420)
rL2     = rotate (sizeL2, 7)
sizeL3n = rebin (L3n, 410,420)
rL3n    = rotate (sizeL3n, 7)
WINDOW, 1, XSize = 410, YSize = 420, Title = "L1" + " : "
TVscl, rL1
WINDOW, 2, XSize = 410, YSize = 420, Title = "L2" + " : "
TVscl, rL2
WINDOW, 3, XSize = 410, YSize = 420, Title = "L3n" + " : "
TVscl, rL3n
```

```
;Para guardar las imágenes en formato img
```

```
OPENW, 1, 'D:\ASTER\BANDA1.img'
WRITEU, 1, L1
CLOSE, 1
OPENW, 2, 'D:\ASTER\BANDA3.img'
WRITEU, 2, L2
CLOSE, 2
OPENW, 3, 'D:\ASTER\BANDA3.img'
WRITEU, 3, L3n
CLOSE, 3
END
```

```
PRO CALIBRACION_ASTER_SWIR
```

```
FileID = EOS_SW_OPEN('D:\ASTER\AST_L1A.hdf', / Read)
NSwath = EOS_SW_INQSWATH('D:\ASTER\AST_L1A.hdf', SwathList)
```

```
; Obteniendo información de la banda 4
```

```
; Adjuntando objeto imagen
```

```
SwathID      = EOS_SW_ATTACH (FileID,'SWIR_Band4')
NField       = EOS_SW_INQDATAFIELDS (SwathID, FieldList, DataRank, DataTypee)
FieldArr     = STRSPLIT (FieldList, ",", /Extract)
```

```
; Leyendo datos de calibracion
```

```
InfoCalResult = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (11), CalRank4, CalDims4, CalNType4, CalDList4)
ReadCalResult = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (11), Cal4)
```

```

; Leyendo datos de la imagen SWIR banda 4
InfoResult      = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (10), Rank4, Dims4, NType4, DList4)
ReadResult      = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (10), B4)
Status          = EOS_SW_Detach(SwathID)
; Obteniendo información de la banda 5
; Adjuntando objeto imagen
SwathID         = EOS_SW_ATTACH (FileID,'SWIR_Band5')
NField          = EOS_SW_INQDATAFIELDS (SwathID, FieldList, DataRank, DataType)
FieldArr        = STRSPLIT (FieldList, ",", /Extract)
; Leyendo datos de calibracion
InfoCalResult   = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (11), CalRank5, CalDims5, CalNType5, CalDList5)
ReadCalResult   = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (11), Cal5)
; Leyendo datos de la imagen SWIR banda 5
InfoResult      = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (10), Rank5, Dims5, NType5, DList5)
ReadResult      = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (10), B5)
Status          = EOS_SW_Detach(SwathID)
; Obteniendo información de la banda 6
; Adjuntando objeto imagen
SwathID         = EOS_SW_ATTACH (FileID,'SWIR_Band6')
NField          = EOS_SW_INQDATAFIELDS (SwathID, FieldList, DataRank, DataType)
FieldArr        = STRSPLIT (FieldList, ",", /Extract)
; Leyendo datos de calibracion
InfoCalResult   = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (11), CalRank6, CalDims6, CalNType6, CalDList6)
ReadCalResult   = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (11), Cal6)
; Leyendo datos de la imagen SWIR banda 6
InfoResult      = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (10), Rank6, Dims6, NType6, DList6)
ReadResult      = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (10), B6)
Status          = EOS_SW_Detach(SwathID)
; Obteniendo información de la banda 7
; Adjuntando objeto imagen
SwathID         = EOS_SW_ATTACH (FileID,'SWIR_Band7')
NField          = EOS_SW_INQDATAFIELDS (SwathID, FieldList, DataRank, DataType)
FieldArr        = STRSPLIT (FieldList, ",", /Extract)
; Leyendo datos de calibracion
InfoCalResult   = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (11), CalRank7, CalDims7, CalNType7, CalDList7)
ReadCalResult   = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (11), Cal7)
; Leyendo datos de la imagen SWIR banda 5
InfoResult      = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (10), Rank7, Dims7, NType7, DList7)
ReadResult      = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (10), B7)
Status          = EOS_SW_Detach(SwathID)
; Obteniendo información de la banda 8
; Adjuntando objeto imagen
SwathID         = EOS_SW_ATTACH (FileID,'SWIR_Band8')
NField          = EOS_SW_INQDATAFIELDS (SwathID, FieldList, DataRank, DataType)
FieldArr        = STRSPLIT (FieldList, ",", /Extract)
; Leyendo datos de calibracion
InfoCalResult   = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (11), CalRank8, CalDims8, CalNType8, CalDList8)
ReadCalResult   = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (11), Cal8)
; Leyendo datos de la imagen SWIR banda 5
InfoResult      = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (10), Rank8, Dims8, NType8, DList8)
ReadResult      = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (10), B8)
Status          = EOS_SW_Detach(SwathID)
; Obteniendo información de la banda 9
; Adjuntando objeto imagen
SwathID         = EOS_SW_ATTACH (FileID,'SWIR_Band9')
NField          = EOS_SW_INQDATAFIELDS (SwathID, FieldList, DataRank, DataType)
FieldArr        = STRSPLIT (FieldList, ",", /Extract)
; Leyendo datos de calibracion
InfoCalResult   = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (11), CalRank9, CalDims9, CalNType9, CalDList9)
ReadCalResult   = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (11), Cal9)
; Declaracion de las Variables
L4              = fltarr (2048,2100)
L5              = fltarr (2048,2100)
L6              = fltarr (2048,2100)
L7              = fltarr (2048,2100)
L8              = fltarr (2048,2100)
L9              = fltarr (2048,2100)

```

```

; Calibración de la bandas 4, 5, 6, 7, 8 y 9
FOR i = 0, 2047 DO FOR j = 0, 2099 DO BEGIN
L4(i,j) = Cal4(1,i)* B4(i,j) / Cal4(2,i) + Cal4(0,i)
L5(i,j) = Cal5(1,i)* B5(i,j) / Cal5(2,i) + Cal5(0,i)
L6(i,j) = Cal6(1,i)*B6(i,j) / Cal6(2,i) + Cal6(0,i)
L6(i,j) = Cal7(1,i)*B7(i,j) / Cal7(2,i) + Cal7(0,i)
L6(i,j) = Cal8(1,i)*B8(i,j) / Cal8(2,i) + Cal8(0,i)
L6(i,j) = Cal9(1,i)*B9(i,j) / Cal9(2,i) + Cal9(0,i)
ENDFOR
; Visualización de los datos
sizeL4 = rebin (L4, 512,700)
rL4 = rotate (sizeL4, 7)
sizeL5 = rebin (L5, 512,700)
rL5 = rotate (sizeL5, 7)
sizeL6 = rebin (L6, 512,700)
rL6 = rotate (sizeL6, 7)
sizeL7 = rebin (L7, 512,700)
rL7 = rotate (sizeL7, 7)
sizeL8 = rebin (L8, 512,700)
rL8 = rotate (sizeL8, 7)
sizeL9 = rebin (L9, 512,700)
rL9 = rotate (sizeL9, 7)
WINDOW, 1, XSize = 512, YSize = 700, Title = "L4" + " : "
TVscl, rL4
WINDOW, 2, XSize = 512, YSize = 700, Title = "L5" + " : "
TVscl, rL5
WINDOW, 3, XSize = 512, YSize = 700, Title = "L6" + " : "
TVscl, rL6
WINDOW, 4, XSize = 512, YSize = 700, Title = "L7" + " : "
TVscl, rL7
WINDOW, 5, XSize = 512, YSize = 700, Title = "L8" + " : "
TVscl, rL8
WINDOW, 6, XSize = 512, YSize = 700, Title = "L9" + " : "
TVscl, rL9
; Para guardar las imágenes en formato img
OPENW, 1, 'D:\ASTER\BANDA4.img'
WRITEU, 1, L4
CLOSE, 1
OPENW, 2, 'D:\ASTER\BANDA5.img'
WRITEU, 2, L5
CLOSE, 2
OPENW, 3, 'D:\ASTER\BANDA6.img'
WRITEU, 3, L6
CLOSE, 3
OPENW, 4, 'D:\ASTER\BANDA7.img'
WRITEU, 4, L7
CLOSE, 4
OPENW, 5, 'D:\ASTER\BANDA8.img'
WRITEU, 5, L8
CLOSE, 5
OPENW, 6, 'D:\ASTER\BANDA9.img'
WRITEU, 6, L9
CLOSE, 6
END

```

PRO NDVI_VNIR

```

FileID = EOS_SW_OPEN('D:\ASTER\AST_L1A.hdf', / Read)
NSwath = EOS_SW_INQSWATH('D:\ASTER\AST_L1A.hdf', SwathList)
; Obteniendo información de la banda 2
; Adjuntando objeto imagen
SwathID = EOS_SW_ATTACH (FileID,'VNIR_Band2')
NField = EOS_SW_INQDATAFIELDS (SwathID, FieldList, DataRank, DataType)
FieldArr = STRSPLIT (FieldList, ",", /Extract)
; Leyendo datos de calibracion
InfoCalResult = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (8), CalRank2, CalDims2, CalNType2, CalDList2)
ReadCalResult = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (8), Cal2)

```

```

; Leyendo datos de la imagen VNIR banda 2
InfoResult      = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (7), Rank2, Dims2, NType2, DList2)
ReadResult      = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (7), B2)
Status          = EOS_SW_Detach(SwathID)
; Obteniendo información de la banda 3n
SwathID         = EOS_SW_ATTACH (FileID,'VNIR_Band3N')
NField          = EOS_SW_INQDATAFIELDS (SwathID, FieldList, DataRank, DataType)
FieldArr        = STRSPLIT (FieldList, ",", /Extract)
; Lee datos de calibracion
InfoCalResult= EOS_SW_FieldInfo (SwathID, FieldArr (8), CalRank3n, CalDims3n, CalNType3n, CalDList3n)
ReadCalResult= EOS_SW_ReadField (SwathID, FieldArr (8), Cal3n)
; Lee datos de la imagen VNIR banda 3n
InfoResult      = EOS_SW_FieldInfo (SwathID, FieldArr (7), Rank3n, Dims3n, NType3n, DList3n)
ReadResult      = EOS_SW_ReadField (SwathID, FieldArr (7), B3n)
Status          = EOS_SW_Detach (SwathID)
Status          = EOS_SW_Close(FileID)
; Declaración de las Variables
L2              = fltarr (4100,4200)
L3n             = fltarr (4100,4200)
ndvi            = fltarr (4100,4200)
ndvib           = bytarr (4100,4200)
; Calibración de la bandas 2 y 3n
FOR i = 0, 4099 DOFOR j = 0, 4199 DOBEGIN
  L2(i,j) = Cal2(1,i)* B2(i,j) / Cal2(2,i) + Cal2(0,i)
  L3n(i,j) = Cal3n(1,i)*B3n(i,j) / Cal3n(2,i) + Cal3n(0,i)
ENDFOR
; Indice de vegetacion (NDVI)
ndvi(i,j)=(1840*L3n(i,j)-1044*L2(i,j))/(1840*L3n(i,j)+1044*L2(i,j))
IF (ndvi (i, j) LE 1.0) AND (ndvi (i, j) GT -0.1) THENBEGIN
  ndvi(i, j) = ndvi(i,j)
ENDIFELSEBEGIN
  ndvi (i, j) = -0.1
ENDIFELSE
ENDFOR
ndvib = byte ((ndvi + 0.1)*255/1.1)
; Visualización de los datos
; sizeL2          = rebin (L2, 410,420)
; rL2             = rotate (sizeL2, 7)
; sizeL3n         = rebin (L3n, 410,420)
; rL3n            = rotate (sizeL3n, 7)
Sizendvib        = rebin (ndvib, 410,420)
Rndvib           = rotate (sizendvib,7)
; WINDOW, 0, XSize = 410, YSize = 420, Title = "VNIR_Band2" +":."
;TVscl, rL2
; WINDOW, 1, XSize = 410, YSize = 420, Title = "VNIR_Band3n" +":."
;TVscl, rL3n
WINDOW, 2, XSize = 410, YSize = 420, Title = "NDVI" +":."
TVscl, rndvib
; Para guardar la imagen en formato IMG
OPENW,2, 'D:\ASTER\NDVI.img'
WRITEU, 2, ndvib
CLOSE,2
END

```

PRO INDSAL_SWIR

```

FileID = EOS_SW_OPEN('D:\ASTER\AST_L1A.hdf', / Read)
NSwath = EOS_SW_INQSWATH('D:\ASTER\AST_L1A.hdf', SwathList)
; Obteniendo información de la banda 4
; Adjuntando objeto imagen
SwathID      = EOS_SW_ATTACH (FileID,'SWIR_Band4')
NField       = EOS_SW_INQDATAFIELDS (SwathID, FieldList, DataRank, DataType)
FieldArr     = STRSPLIT (FieldList, ",", /Extract)
; Leyendo datos de calibracion
InfoCalResult = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (11), CalRank4, CalDims4, CalNType4, CalDList4)
ReadCalResult = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (11), Cal4)
; Leyendo datos de la imagen SWIR banda 4

```

```

InfoResult      = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (10), Rank4, Dims4, NType4, DList4)
ReadResult      = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (10), B4)
Status          = EOS_SW_Detach(SwathID)
; Obteniendo información de la banda 5
; Adjuntando objeto imagen
SwathID         = EOS_SW_ATTACH (FileID,'SWIR_Band5')
NField          = EOS_SW_INQDATAFIELDS (SwathID, FieldList, DataRank, DataType)
FieldArr        = STRSPLIT (FieldList, ",", /Extract)
; Leyendo datos de calibración
InfoCalResult   = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (11), CalRank5, CalDims5, CalNType5, CalDList5)
ReadCalResult   = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (11), Cal5)
; Leyendo datos de la imagen SWIR banda 5
InfoResult      = EOS_SW_FieldInfo(SwathID, FieldArr (10), Rank5, Dims5, NType5, DList5)
ReadResult      = EOS_SW_ReadField(SwathID, FieldArr (10), B5)
Status          = EOS_SW_Detach(SwathID)
; Declaración de las Variables
L4              = fltarr (2048,2100)
L5              = fltarr (2048,2100)
Sal             = fltarr (2048, 2100)
; Calibración de las bandas 4 y 5
FOR j = 0, 2099 DO FOR i = 0, 2047 DO BEGIN
L4(i,j) = Cal4(1,2047-i)* B4(i,j) / Cal4(2,2047-i) + Cal4(0,2047-i)
L5(i,j) = Cal5(1,2047-i)* B5(i,j) / Cal5(2,2047-i) + Cal5(0,2047-i)
; Indice de sal
sal(i,j) = (L4(i,j)-L5(i,j))/(L4(i,j)+L5(i,j))
ENDFOR
; Visualización de los datos
; sizeL4        = rebin (L4, 512,525)
; rL4           = rotate (sizeL4, 7)
; sizeL5        = rebin (L5, 512,525)
; rL5           = rotate (sizeL5, 7)
; Sizesal       = rebin(sal, 512,525)
; rsal          = rotate (sizesal,7)
; WINDOW, 0, XSize = 512, YSize = 525, Title = "SWIR_Band4" + ":"
; TVscl, rL4
; WINDOW, 1, XSize = 512, YSize = 525, Title = "SWIR_Band5" + ":"
; TVscl, rL5
WINDOW, 2, XSize = 512, YSize = 525, Title = "indice de sal" + ":"
TVscl, rsal
; Para guardar imagen en formato img
; OPENW, 1, 'D:\ASTER\NDVI.img'
; WRITEU, 1, sal
; CLOSE, 1
; OPENW, 2, 'D:\ASTER\NDVI.img'
; WRITEU, 2, L4
; CLOSE, 2
OPENW, 3, 'D:\ASTER\NDVI.img'
WRITEU, 3, L5
CLOSE, 3
END

```

Procesamiento de las imágenes ETM+, usando IDL

PRO RADIANCIAETM+

```

; Paso 1. Convertir ND a radiancia (L) espectral
B1=READ_TIFF("D:\Landsat\BANDA_B1.tif", geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
B2=READ_TIFF("D:\Landsat\BANDA_B2.tif", geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
B3=READ_TIFF("D:\Landsat\BANDA_B3.tif", geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
B4=READ_TIFF("D:\Landsat\BANDA_B4.tif", geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
B5=READ_TIFF("D:\Landsat\BANDA_B5.tif", geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
B7=READ_TIFF("D:\Landsat\BANDA_B7.tif", geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY)
openr, lun, 'D:\Landsat\DataLandsat.txt', /get_lun
header = strarr(81)
readf, lun, header
; Print, header
junk=""

```

```

lmax1=0.0
lmin1=0.0
lmax2=0.0
lmin2=0.0
lmax3=0.0
lmin3=0.0
lmax4=0.0
lmin4=0.0
lmax5=0.0
lmin5=0.0
lmax7=0.0
lmin7=0.0
reads, header(63), junk, lmax1, FORMAT='(A16, x, F8.3)'
reads, header(64), junk, lmin1, FORMAT='(A16, x, F8.3)'
reads, header(65), junk, lmax2, FORMAT='(A16, x, F8.3)'
reads, header(66), junk, lmin2, FORMAT='(A16, x, F8.3)'
reads, header(67), junk, lmax3, FORMAT='(A16, x, F8.3)'
reads, header(68), junk, lmin3, FORMAT='(A16, x, F8.3)'
reads, header(69), junk, lmax4, FORMAT='(A16, x, F8.3)'
reads, header(70), junk, lmin4, FORMAT='(A16, x, F8.3)'
reads, header(71), junk, lmax5, FORMAT='(A16, x, F8.3)'
reads, header(72), junk, lmin5, FORMAT='(A16, x, F8.3)'
reads, header(77), junk, lmax7, FORMAT='(A16, x, F8.3)'
reads, header(78), junk, lmin7, FORMAT='(A16, x, F8.3)'
print, lmax1,lmin1,lmax2,lmin2,lmax3,lmin3,lmax4,lmin4,lmax5,lmin5,lmax7,lmin7
Qcalmax=255.0
Qcalmin=1.0
gains1= (Lmax1-Lmin1)/(Qcalmax-Qcalmin),L1=temporary( (GAINS1)* (B1(*,*)-Qcalmin) + Lmin1 )
gains2= (Lmax2-Lmin2)/(Qcalmax-Qcalmin),L2=temporary( (GAINS2)* (B2(*,*)-Qcalmin) + Lmin2 )
gains3= (Lmax3-Lmin3)/(Qcalmax-Qcalmin),L3=temporary( (GAINS3)* (B3(*,*)-Qcalmin) + Lmin3 )
gains4= (Lmax4-Lmin4)/(Qcalmax-Qcalmin),L4=temporary( (GAINS4)* (B4(*,*)-Qcalmin) + Lmin4 )
gains5= (Lmax5-Lmin5)/(Qcalmax-Qcalmin),L5=temporary( (GAINS5)* (B5(*,*)-Qcalmin) + Lmin5 )
gains7= (Lmax7-Lmin7)/(Qcalmax-Qcalmin),L7=temporary( (GAINS7)* (B7(*,*)-Qcalmin) + Lmin7 )
; Paso 2. Guardando la radiancia (L) espectral
WRITE_TIFF, "D:\Landsat\rad1.tif", L1, geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF, "D:\Landsat\rad2.tif", L2, geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF, "D:\Landsat\rad3.tif", L3, geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF, "D:\Landsat\rad4.tif", L4, geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF, "D:\Landsat\rad5.tif", L5, geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
WRITE_TIFF, "D:\Landsat\rad7.tif", L7, geotiff=GTMODELTYPEGEOKEY, /FLOAT
print, 'Fin del Procesamiento'
end

```

Procesamiento de las imágenes TM, usando IDL

PRO RADIANCE.TM

```

; Paso 1: Seleccionamos la imagen
envi_select, title='elige la imagen', $
fid=fid, dims=dims, pos=pos
IF (fid EQ -1) THENBEGIN
PRINT, 'cancelado'
RETURN
ENDIF
; Paso 2: Obtenos informacion del imagen seleccionada
;envi_file_query, fid, fname=fname
num_cols = dims[2] - dims[1]+1
num_rows = dims[4] - dims[3]+1
nb = n_elements(pos)
gain = fltarr(nb)
offset = fltarr(nb)
image = fltarr(num_cols, num_rows,nb)
L = fltarr(num_cols, num_rows)
gain[0] = 0.765827
gain[1] = 1.448189
gain[2] = 1.043976
gain[3] = 0.876024

```

```

gain[4] = 0.120354
gain[5] = 0.065551
offset[0] = -2.290
offset[1] = -4.290
offset[2] = -2.210
offset[3] = -2.390
offset[4] = -0.490
offset[5] = -0.220
for i=0, nb-1 do begin
image[*,*,i] = envi_get_data(fid=fid,dims=dims, pos=pos[i])
L=temporary(Gain[i]*image[*,*,i] + Offset[i])
for j= 0,num_cols-1 do begin
for k=0,num_rows-1 do begin
if L[j,k] le 0.00000 then L[j,k]=0.0
endfor
endfor
image[*,*,i] = L
endfor
fname='rad.img'
openw, unit, fname, /get_lun
writeu, unit, image
free_lun, unit
ENVI_SETUP_HEAD, fname=fname, ns=num_cols, nl=num_rows, nb=nb, $
interleave=0, data_type=4, offset=0, map_info=map_info,/write,/open

END

```


ANEXO 4

TABLA DE LOS DATOS DE LA CE DEL SUELO IN-SITU Y LA CE DEL SUELO ESTIMADA

Tabla 14. Tabla de los datos de CE de suelo in-situ de fecha 14 de diciembre del 2007 y los datos de CE del suelo estimada del área La Viña.

AREA DE LA VIÑA			FECHA DE MUESTREO: 14/12/2007														
Nº	WGS - 84 – GPS UTM, ZONA 17 S		WGS 84 – IMAGEN UTM, ZONA 17 S		COLUMN A	FILAS	CE (1:5)	REFLECTANCIA - ASTER									CE estimada
MUESTRA	ESTE(m)	SUR(m)	ESTE(m)	SUR(m)			dS/m	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	dS/m
1	670063	9237666	670049	9237670	3622	1480	0,462	0,134	0,148	0,210	0,295	0,249	0,251	0,263	0,248	0,297	0,472
2	670006	9237653	670004	9237655	3619	1481	0,585	0,141	0,157	0,214	0,294	0,250	0,255	0,266	0,248	0,296	0,551
3	669825	9237613	669824	9237625	3607	1483	0,438	0,135	0,147	0,204	0,284	0,242	0,244	0,253	0,241	0,290	0,551
4	669765	9237600	669764	9237610	3603	1484	0,425	0,133	0,146	0,204	0,286	0,245	0,245	0,257	0,243	0,292	0,420
5	669645	9237574	669644	9237580	3595	1486	0,413	0,137	0,148	0,207	0,293	0,250	0,253	0,262	0,250	0,292	0,454
6	669585	9237560	669584	9237565	3591	1487	0,267	0,135	0,136	0,206	0,280	0,245	0,248	0,260	0,243	0,294	0,379
7	669466	9237534	669464	9237535	3583	1489	0,328	0,136	0,146	0,204	0,290	0,248	0,250	0,255	0,246	0,294	0,481
8	669408	9237522	669404	9237535	3579	1489	0,400	0,134	0,146	0,204	0,287	0,246	0,251	0,254	0,246	0,292	0,465
9	669475	9237474	669464	9237475	3583	1493	0,316	0,135	0,135	0,199	0,283	0,242	0,241	0,247	0,240	0,288	0,350
10	669535	9237487	669524	9237490	3587	1492	0,317	0,135	0,134	0,199	0,280	0,246	0,241	0,246	0,236	0,287	0,410
11	669601	9237502	669599	9237505	3592	1491	0,207	0,134	0,131	0,198	0,280	0,241	0,243	0,246	0,237	0,283	0,341
12	669781	9237540	669779	9237550	3604	1488	0,368	0,137	0,149	0,208	0,289	0,245	0,246	0,255	0,246	0,291	0,542
13	669899	9237565	669899	9237565	3612	1487	0,662	0,141	0,157	0,215	0,296	0,247	0,255	0,265	0,250	0,296	0,585
14	669958	9237579	669944	9237580	3615	1486	0,505	0,140	0,154	0,212	0,296	0,248	0,251	0,262	0,248	0,295	0,524
15	670077	9237605	670064	9237610	3623	1484	0,451	0,138	0,153	0,213	0,291	0,250	0,253	0,263	0,248	0,291	0,485
16	670196	9237635	670184	9237640	3631	1482	0,530	0,139	0,154	0,214	0,292	0,249	0,249	0,257	0,248	0,296	0,476
17	670254	9237650	670244	9237655	3635	1481	0,505	0,139	0,157	0,213	0,295	0,250	0,253	0,260	0,247	0,293	0,544
18	670267	9237589	670259	9237595	3636	1485	0,399	0,137	0,153	0,212	0,290	0,246	0,247	0,254	0,244	0,292	0,520
19	670149	9237560	670139	9237565	3628	1487	0,232	0,134	0,132	0,205	0,281	0,242	0,244	0,255	0,241	0,287	0,360
20	669970	9237519	669959	9237520	3616	1490	0,480	0,141	0,154	0,214	0,295	0,249	0,252	0,263	0,247	0,292	0,434
21	669850	9237492	669839	9237505	3608	1491	0,517	0,135	0,147	0,204	0,287	0,245	0,246	0,258	0,243	0,292	0,506
22	669790	9237480	669779	9237490	3604	1492	0,425	0,135	0,150	0,209	0,290	0,245	0,250	0,260	0,245	0,291	0,490
23	669434	9237403	669434	9237415	3581	1497	0,336	0,134	0,135	0,201	0,282	0,243	0,241	0,245	0,241	0,291	0,343

Tabla 15. Tabla de los datos de CE del suelo in-situ de fecha 14 de diciembre del 2007 y los datos de CE del suelo estimada del área La Viña.

AREA DE LA VIÑA			FECHA DE MUESTREO: 14/12/2007											
Nº	WGS - 84 – GPS UTM, ZONA 17 S		WGS 84 – IMAGEN UTM, ZONA 17 S		COLUMNA	FILA	CE (1:5)	REFLECTANCIA - ETM+						CE estimada
MUESTRA	ESTE(m)	SUR(m)	ESTE(m)	SUR(m)			dS/m	B1	B2	B3	B4	B5	B7	dS/m
1	670241	9237709	670214	9237715	6342	2311	0,376	0,0549	0,0836	0,1105	0,1516	0,2435	0,2289	0,392
2	670063	9237666	670034	9237685	6336	2312	0,462	0,0549	0,0843	0,1105	0,1516	0,2510	0,2363	0,514
3	670006	9237653	670004	9237655	6335	2313	0,585	0,0585	0,0872	0,1105	0,1659	0,2515	0,2359	0,512
4	669945	9237639	669944	9237655	6333	2313	0,364	0,0585	0,0813	0,1105	0,1559	0,2410	0,2289	0,346
5	669825	9237613	669824	9237625	6329	2314	0,438	0,0556	0,0843	0,1113	0,1604	0,2481	0,2289	0,464
6	669645	9237574	669644	9237595	6323	2315	0,413	0,0549	0,0843	0,1113	0,1691	0,2520	0,2476	0,541
7	669585	9237560	669584	9237565	6321	2316	0,267	0,0547	0,0799	0,1079	0,1456	0,2420	0,2324	0,229
8	666694	9237534	666674	9237535	6224	2317	0,328	0,0514	0,0804	0,0988	0,1571	0,2478	0,2249	0,291
9	669408	9237522	669404	9237535	6315	2317	0,400	0,0560	0,0813	0,1029	0,1671	0,2514	0,2288	0,372
10	669475	9237474	669464	9237475	6317	2319	0,316	0,0551	0,0840	0,1048	0,1551	0,2483	0,2287	0,352
11	669535	9237487	669524	9237505	6319	2318	0,317	0,0551	0,0804	0,1079	0,1428	0,2513	0,2287	0,421
12	669716	9237526	669704	9237535	6325	2317	0,334	0,0567	0,0840	0,1109	0,1597	0,2478	0,2324	0,444
13	669781	9237540	669764	9237565	6327	2316	0,368	0,0529	0,0843	0,1052	0,1578	0,2481	0,2252	0,336
14	669837	9237552	669824	9237565	6329	2316	0,554	0,0629	0,0843	0,1083	0,1604	0,2550	0,2327	0,530
15	669899	9237565	669884	9237565	6331	2316	0,662	0,0581	0,0872	0,1105	0,1708	0,2520	0,2489	0,579
16	670077	9237605	670064	9237625	6337	2314	0,451	0,0585	0,0836	0,1075	0,1516	0,2520	0,2289	0,490
17	670196	9237635	670184	9237655	6341	2313	0,530	0,0575	0,0840	0,1075	0,1516	0,2471	0,2340	0,489
18	670267	9237589	670244	9237595	6343	2315	0,399	0,0540	0,0827	0,1067	0,1556	0,2410	0,2288	0,382
19	670209	9237574	670184	9237595	6341	2315	0,293	0,0512	0,0799	0,1075	0,1516	0,2375	0,2252	0,296
20	670089	9237546	670064	9237565	6337	2316	0,623	0,0575	0,0836	0,1135	0,1646	0,2584	0,2512	0,655
21	669970	9237519	669944	9237535	6333	2317	0,480	0,0540	0,0865	0,1067	0,1638	0,2507	0,2286	0,444
22	669671	9237454	669644	9237475	6323	2319	0,814	0,0629	0,0877	0,1139	0,1815	0,2620	0,2512	0,761
23	669492	9237415	669464	9237415	6317	2321	0,549	0,0587	0,0840	0,1109	0,1728	0,2513	0,2324	0,455
24	669434	9237403	669434	9237415	6316	2321	0,336	0,0587	0,0840	0,1048	0,1500	0,2513	0,2287	0,366

Tabla 16. Tabla de los datos de CE del suelo in-situ de fecha 26 de enero del 2008 y los datos de CE del suelo estimada del área La Viña.

AREA DE LA VIÑA			FECHA DE MUESTREO: 26/01/2008											
Nº	WGS - 84 – GPS UTM, ZONA 17 S		WGS 84 – IMAGEN UTM, ZONA 17 S		COLUMNA	FILA	CE (1:5)	REFLECTANCIA-ETM+						CE estimada
	ESTE(m)	SUR(m)	ESTE(m)	SUR(m)				B1	B2	B3	B4	B5	B7	
MUESTRA	ESTE(m)	SUR(m)	ESTE(m)	SUR(m)	COLUMNA	FILA	dS/m	B1	B2	B3	B4	B5	B7	dS/m
1	669132	9236793	669104	9236815	6305	2301	0,826	0,0720	0,2952	0,2155	0,1478	0,0720	0,2952	0,762
2	669192	9236806	669164	9236815	6307	2301	0,536	0,0696	0,3276	0,2190	0,1349	0,0696	0,3276	0,515
3	669251	9236818	669224	9236845	6309	2300	0,807	0,0896	0,2842	0,2155	0,1711	0,0896	0,2842	0,693
4	669311	9236831	669284	9236845	6311	2300	1,274	0,0898	0,3586	0,2475	0,1840	0,0898	0,3586	1,287
5	669297	9236891	669284	9236905	6311	2298	0,303	0,0689	0,2952	0,2055	0,1440	0,0689	0,2952	0,387
6	669237	9236878	669224	9236905	6309	2298	0,174	0,0628	0,3518	0,1948	0,1263	0,0628	0,3518	0,191
7	669178	9236865	669164	9236875	6307	2299	0,238	0,0627	0,2975	0,2008	0,1325	0,0627	0,2975	0,243
8	669118	9236853	669104	9236875	6305	2299	0,318	0,0682	0,2952	0,2155	0,1416	0,0682	0,2952	0,514
9	669060	9236840	669044	9236845	6303	2300	0,396	0,0670	0,2757	0,2011	0,1403	0,0670	0,2757	0,335
10	669000	9236827	668984	9236845	6301	2300	0,363	0,0696	0,2952	0,1975	0,1440	0,0696	0,2952	0,322
11	669013	9236767	668984	9236785	6301	2302	0,688	0,0726	0,2736	0,2187	0,1554	0,0726	0,2736	0,618
12	669073	9236780	669044	9236785	6303	2302	0,541	0,0662	0,2653	0,2188	0,1516	0,0662	0,2653	0,618
13	662962	9235792	662954	9235795	6098	2336	1,037	0,0866	0,3034	0,2300	0,1557	0,0866	0,3034	1,045
14	663124	9235889	663104	9235915	6100	2335	1,061	0,0888	0,2968	0,2385	0,1586	0,0888	0,2968	1,146
15	663178	9235920	663164	9235945	6105	2331	0,506	0,0797	0,3012	0,2321	0,1586	0,0797	0,3012	1,084
16	663230	9235951	663224	9235975	6107	2330	0,532	0,0773	0,3546	0,2257	0,1472	0,0773	0,3546	0,949
17	663283	9235983	663254	9236005	6109	2329	0,299	0,0621	0,2724	0,2106	0,1320	0,0621	0,2724	0,307
18	662933	9235846	662924	9235855	6110	2328	0,798	0,0704	0,2701	0,2272	0,1420	0,0704	0,2701	0,931
19	662976	9235872	662954	9235885	6097	2334	0,686	0,0735	0,2523	0,2172	0,1510	0,0735	0,2523	0,891
20	663027	9235902	663014	9235915	6099	2333	0,674	0,0859	0,2934	0,2357	0,1601	0,0859	0,2934	1,128
21	663078	9235932	663074	9235945	6100	2332	0,502	0,0730	0,2745	0,2264	0,1654	0,0730	0,2745	1,072
22	663129	9235962	663104	9235975	6102	2331	0,524	0,0859	0,3190	0,2292	0,1623	0,0859	0,3190	1,079
23	663180	9235993	663164	9236005	6104	2330	0,489	0,0735	0,3457	0,2250	0,1319	0,0735	0,3457	0,846
24	663232	9236024	663224	9236035	6105	2329	0,498	0,0735	0,3058	0,2292	0,1433	0,0735	0,3058	0,959
25	663285	9236055	663284	9236065	6107	2328	0,521	0,0637	0,3569	0,2284	0,1283	0,0637	0,3569	0,856
26	663337	9236087	663314	9236095	6109	2327	0,591	0,0848	0,3050	0,2298	0,1453	0,0848	0,3050	0,977
27	663200	9236074	663194	9236095	6111	2326	0,528	0,0831	0,3586	0,2228	0,1440	0,0831	0,3586	0,901
28	663098	9236013	663074	9236035	6112	2325	0,750	0,0766	0,3324	0,2285	0,1433	0,0766	0,3324	0,952
29	662893	9235893	662864	9235915	6104	2327	1,156	0,0880	0,3437	0,2438	0,1720	0,0880	0,3437	1,282
30	662841	9235863	662834	9235885	6099	2330	0,715	0,0896	0,3081	0,2430	0,1693	0,0896	0,3081	1,257

Tabla 17. Tabla de los datos de CE del suelo in-situ de fecha 23 de agosto del 2008 y los datos de CE del suelo estimada del área Saltur.

AREA DE LA SALTUR			FECHA DE MUESTREO: 23/08/2008											
Nº	WGS - 84 – GPS UTM, ZONA 17 S		WGS 84 – IMAGEN UTM, ZONA 17 S		COLUMNA	FILA	CE(1:5)	REFLECTANCIA-TM						CE estimada
	MUESTRA	ESTE(m)	SUR(m)	ESTE(m)				SUR(m)	dS/m	B1	B2	B3	B4	B5
1	654371	9244676	654360	9244699	5636	1632	0,376	0,1112	0,1510	0,1701	0,2032	0,2600	0,2281	0,175
2	654435	9244626	654420	9244639	5638	1634	0,462	0,1217	0,1508	0,1850	0,2076	0,2711	0,2445	0,197
3	654478	9244600	654450	9244609	5639	1635	0,205	0,1269	0,1753	0,1926	0,2121	0,2655	0,2281	0,197
4	654526	9244570	654510	9244579	5641	1636	0,364	0,1269	0,1704	0,1888	0,2030	0,2628	0,2322	0,209
5	654555	9244554	654540	9244579	5642	1636	0,438	0,1217	0,1606	0,1850	0,1985	0,2628	0,2363	0,145
6	654594	9244534	654570	9244549	5643	1637	0,413	0,1224	0,1466	0,1592	0,2075	0,2407	0,1871	0,161
7	654639	9244510	654630	9244519	5645	1638	0,267	0,0987	0,1270	0,1366	0,2121	0,2047	0,1544	0,285
8	654751	9244662	654750	9244669	5649	1633	0,328	0,0802	0,0975	0,1063	0,1939	0,1991	0,1503	0,199
9	654803	9244656	654780	9244669	5650	1633	0,400	0,0881	0,1024	0,1139	0,1894	0,1991	0,1585	0,343
10	654732	9244766	654720	9244789	5648	1629	0,196	0,1065	0,1270	0,1366	0,1895	0,2434	0,2035	0,380
11	654675	9244766	654660	9244789	5646	1629	0,317	0,1091	0,1270	0,1479	0,1804	0,2407	0,2158	0,452
12	654619	9244836	654600	9244849	5644	1627	0,334	0,1012	0,1171	0,1252	0,1804	0,2296	0,1953	0,410
13	654559	9244836	654540	9244849	5642	1627	0,368	0,0901	0,1215	0,1323	0,2032	0,1908	0,1502	0,220
14	654518	9244766	654510	9244789	5641	1629	0,554	0,1033	0,1313	0,1474	0,1941	0,2323	0,2117	0,408
15	654507	9244836	654480	9244849	5640	1627	0,662	0,0875	0,1068	0,1058	0,2123	0,2074	0,1707	0,401
16	654470	9244838	654450	9244849	5639	1627	0,451	0,1112	0,1362	0,1512	0,1987	0,2378	0,2076	0,318
17	654569	9244920	654540	9244939	5642	1624	0,530	0,1296	0,1559	0,1852	0,2305	0,2683	0,2403	0,288
18	654317	9244880	654300	9244909	5634	1625	0,099	0,1217	0,1510	0,1663	0,2168	0,2600	0,2321	0,321
19	654415	9244842	654390	9244849	5637	1627	0,113	0,1138	0,1510	0,1701	0,2077	0,2600	0,2321	0,439
20	654452	9244766	654450	9244789	5639	1629	0,623	0,1112	0,1460	0,1550	0,2077	0,2351	0,2117	0,326
21	654365	9244790	654360	9244819	5636	1628	0,180	0,1138	0,1559	0,1814	0,2077	0,2489	0,2158	0,391
22	654421	9244804	654420	9244819	5638	1628	0,814	0,1165	0,1411	0,1625	0,2077	0,2572	0,2199	0,413
23	654320	9244766	654300	9244789	5634	1629	0,089	0,1112	0,1510	0,1701	0,2123	0,2351	0,2076	0,421
24	654259	9244816	654240	9244819	5632	1628	0,336	0,1059	0,1510	0,1738	0,2123	0,2046	0,1789	0,452

Tabla 18. Tabla de los datos de CE del suelo in-situ de fecha 23 de agosto del 2008 y los datos de CE del suelo estimada del área San Antero.

AREA DE LA SAN ANTERO			FECHA DE MUESTREO: 23/08/2008											
N°	WGS - 84 – GPS UTM, ZONA 17 S		WGS 84 – IMAGEN UTM, ZONA 17 S		COLUMNA	FILA	CE(1:5)	REFLECTANCIA-TM						CE estimada
	ESTE(m)	SUR(m)	ESTE(m)	SUR(m)				B1	B2	B3	B4	B5	B7	
MUESTRA	ESTE(m)	SUR(m)	ESTE(m)	SUR(m)	COLUMNA	FILA	dS/m	B1	B2	B3	B4	B5	B7	dS/m
1	662206	9236178	662197	9236186	11995	3835	0,221	0,0657	0,0738	0,0635	0,3721	0,1658	0,0804	0,221
2	662289	9236184	662287	9236186	12001	3835	0,164	0,0630	0,0688	0,0648	0,3314	0,1678	0,0796	0,164
3	662239	9236116	662227	9236126	11997	3839	0,040	0,0604	0,0836	0,0635	0,3340	0,1567	0,0564	0,040
4	662231	9236074	662227	9236081	11997	3842	0,135	0,0577	0,0688	0,0559	0,3454	0,1622	0,0732	0,135
5	662195	9236116	662182	9236126	11994	3839	0,073	0,0551	0,0639	0,0597	0,3305	0,1612	0,0598	0,073
6	662201	9236130	662197	9236141	11995	3838	0,154	0,0551	0,0688	0,0521	0,3603	0,1610	0,0773	0,154
7	662127	9236110	662122	9236111	11990	3840	0,154	0,0577	0,0738	0,0597	0,3857	0,1695	0,0691	0,154
8	662093	9236088	662092	9236096	11988	3841	0,130	0,0577	0,0688	0,0597	0,3812	0,1667	0,0650	0,130
9	662061	9236064	662047	9236066	11985	3843	0,164	0,0528	0,0692	0,0563	0,3834	0,1629	0,0609	0,164
10	661921	9235942	661912	9235946	11976	3851	0,121	0,0581	0,0692	0,0411	0,3807	0,1584	0,0568	0,121
11	661880	9235998	661867	9236006	11973	3847	0,142	0,0501	0,0791	0,0601	0,3672	0,1612	0,0796	0,142
12	662029	9236098	662017	9236111	11983	3840	0,161	0,0554	0,0741	0,0525	0,3660	0,1640	0,0588	0,161
13	662069	9236128	662062	9236141	11986	3838	0,135	0,0528	0,0741	0,0563	0,3672	0,1560	0,0691	0,135
14	662095	9236156	662092	9236171	11988	3836	0,241	0,0551	0,0639	0,0559	0,3631	0,1678	0,0773	0,241
15	662087	9236210	662077	9236216	11987	3833	0,175	0,0559	0,0699	0,0568	0,3633	0,1623	0,0691	0,175
16	662040	9236208	662032	9236216	11984	3833	0,386	0,0638	0,0749	0,0644	0,3652	0,1640	0,0773	0,386
17	662002	9236180	661987	9236186	11981	3835	0,173	0,0607	0,0741	0,0638	0,3309	0,1602	0,0773	0,173
18	662142	9236190	662137	9236201	11991	3834	0,090	0,0506	0,0550	0,0491	0,3772	0,1556	0,0732	0,090
19	662149	9236244	662137	9236246	11991	3831	0,700	0,0691	0,0846	0,0871	0,3882	0,1730	0,0814	0,700
20	662175	9236224	662167	9236231	11993	3832	0,970	0,0823	0,1191	0,1098	0,4260	0,1760	0,0855	0,970
21	662206	9236178	662197	9236186	11995	3835	0,221	0,0657	0,0738	0,0635	0,3721	0,1658	0,0804	0,221
22	662289	9236184	662287	9236186	12001	3835	0,164	0,0630	0,0688	0,0648	0,3314	0,1678	0,0796	0,164
23	662239	9236116	662227	9236126	11997	3839	0,040	0,0604	0,0836	0,0635	0,3340	0,1567	0,0564	0,040
24	662231	9236074	662227	9236081	11997	3842	0,135	0,0577	0,0688	0,0559	0,3454	0,1622	0,0732	0,135

Tabla 19. Tabla de los datos de CE del suelo in-situ de fecha 23 de agosto del 2008 y los datos de CE del suelo estimada del área Ucupe.

AREA DE LA UCUPE			FECHA DE MUESTREO: 23/08/2008											
N°	WGS - 84 – GPS UTM, ZONA 17 S		WGS 84 – IMAGEN UTM, ZONA 17 S		COLUMNA	FILA	CE (1:5)	REFLECTANCIA-TM						CE estimada
	ESTE(m)	SUR(m)	ESTE(m)	SUR(m)				B1	B2	B3	B4	B5	B7	
MUESTRA	ESTE(m)	SUR(m)	ESTE(m)	SUR(m)	COLUMNA	FILA	dS/m	B1	B2	B3	B4	B5	B7	dS/m
1	650293	9229250	650280	9229279	5500	2146	1,720	0,1701	0,2214	0,2389	0,2628	0,2980	0,2931	0,782
2	650201	9229216	650190	9229219	5497	2148	2,570	0,1679	0,2338	0,2518	0,2721	0,3173	0,3012	2,081
3	650193	9229380	650190	9229399	5497	2142	0,422	0,1587	0,2174	0,2390	0,2538	0,3005	0,2928	0,917
4	650300	9229376	650280	9229399	5500	2142	0,287	0,1659	0,2293	0,2559	0,2626	0,3061	0,2807	0,940
5	650246	9229456	650220	9229459	5498	2140	0,295	0,1613	0,2174	0,2390	0,2538	0,3005	0,2846	0,716
6	650141	9229438	650130	9229459	5495	2140	1,330	0,1613	0,2272	0,2540	0,2720	0,3060	0,2969	1,331
7	650039	9229530	650010	9229549	5491	2137	0,946	0,1587	0,2223	0,2540	0,2720	0,2977	0,2764	0,356
8	650084	9229584	650070	9229609	5493	2135	1,189	0,1587	0,2174	0,2428	0,2675	0,3060	0,2969	1,331
9	650196	9229712	650190	9229729	5497	2131	0,528	0,1681	0,2259	0,2491	0,2674	0,2976	0,2845	0,548
10	650310	9229720	650310	9229729	5501	2131	0,086	0,1594	0,2327	0,2545	0,2761	0,3032	0,2928	1,071
11	650267	9229720	650250	9229729	5499	2131	1,680	0,1672	0,2376	0,2583	0,2807	0,3170	0,2969	1,958
12	650292	9229658	650280	9229549	5500	2137	0,764	0,1711	0,2391	0,2785	0,2807	0,2951	0,2807	0,313
13	650362	9229694	650340	9229699	5502	2132	1,539	0,1685	0,2342	0,2672	0,2762	0,3089	0,2971	1,501
14	650258	9229592	650250	9229609	5499	2135	1,110	0,1606	0,2244	0,2522	0,2626	0,3061	0,2930	1,241
15	650242	9229538	650220	9229549	5498	2137	1,125	0,1639	0,2272	0,2465	0,2629	0,3088	0,2928	1,390
16	650270	9229508	650250	9229519	5499	2138	1,133	0,1685	0,2293	0,2522	0,2626	0,3061	0,2889	1,141
17	650316	9229534	650310	9229549	5501	2137	3,440	0,1764	0,2391	0,2785	0,2853	0,3255	0,3053	2,649
18	650338	9229588	650310	9229609	5501	2135	2,340	0,1764	0,2440	0,2748	0,2853	0,3200	0,3094	2,436
19	650383	9229624	650370	9229639	5503	2134	2,460	0,1711	0,2391	0,2710	0,2762	0,3255	0,3012	2,548
20	650442	9229580	650430	9229609	5505	2135	1,974	0,1685	0,2342	0,2597	0,2717	0,3228	0,3094	2,595
21	650391	9229526	650370	9229549	5503	2137	1,962	0,1790	0,2489	0,2785	0,2853	0,3228	0,3094	2,595
22	650347	9229448	650340	9229459	5502	2140	3,340	0,1659	0,2293	0,2597	0,2717	0,3172	0,3053	2,176
23	650362	9229394	650340	9229399	5502	2142	1,417	0,1711	0,2342	0,2559	0,2671	0,3089	0,2766	0,999
24	650464	9229456	650460	9229459	5506	2140	0,762	0,1711	0,2195	0,2447	0,2671	0,3089	0,2766	0,999
25	650475	9229506	650460	9229519	5506	2138	2,530	0,1842	0,2586	0,2936	0,2943	0,3200	0,3053	2,335